

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514464

MEMS 基 MOS 气体传感器微加热器设计综述*

蒋安炎, 皮梓岐, 杨璐佳, 夏 宇

(重庆理工大学电气与电子工程学院 重庆 400054)

摘 要:金属氧化物半导体(MOS)气体传感器的敏感材料需要在 200°C ~ 500°C 温度下才能与目标气体发生充分且可控的化学反应。微机电系统(MEMS)技术实现了气敏薄膜、加热器和信号处理电路等的单芯片集成,从而显著降低功耗和体积。其中,微加热器作为为气体传感器提供稳定工作温度的重要器件,其设计对传感器的性能有着重要的影响。微加热器的电极形态、尺寸、材料等决定了微热板的温度、功耗、应力等性能。而微加热器的温度均匀性、温度范围、温度响应时间、功耗表现与机械稳定性等共同决定了传感器的灵敏度、选择性、寿命与可靠性。本综述系统梳理了近 5 年微加热器的研究现状,及其优化设计对传感器性能的影响。首先,介绍了半导体的气敏机理和工作温度对性能的影响,并在此基础上介绍了微加热器的热传导、热对流与热辐射理论,归纳了不同研究方法对其模型的估算和优化。其次,详细阐述了微加热器形态结构方面的国内外研究现状,主要包括微加热器的几何设计、隔热结构、悬梁优化和微热阵列,并探讨了这些结构优化对传感器气敏性能的影响。然后,列举了不同材料所设计的微加热器,并对其机械稳定性和电热性能进行评价。最后,对研究现状和关键性能参数进行了总结,并对未来的研究方向进行了展望,为通过优化微加热器提升半导体气体传感器性能提供了思路。

关键词: MOS; 气体传感器; MEMS; 微加热器; 几何结构; 材料

中图分类号: TP212 TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.30

Design of micro-heaters for MEMS-based MOS gas sensors: A review

Jiang Anyan, Pi Ziqi, Yang Lujia, Xia Yu

(School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Metal oxide semiconductor (MOS) gas sensors require their sensing materials to operate at temperatures ranging from 200°C to 500°C to achieve sufficient and controllable chemical reactions with target gases. Micro-electro mechanical systems (MEMS) technology enables the monolithic integration of gas-sensitive films, heaters, and signal processing circuits on a single chip, significantly reducing power consumption and device size. Among these components, the micro-heater, which provides a stable operating temperature for the gas sensor, plays a crucial role in determining the overall sensor performance. The electrode morphology, dimensions, and materials of the micro-heater directly influence key characteristics such as temperature distribution, power consumption, and mechanical stress. Furthermore, the temperature uniformity, operating range, thermal response time, power efficiency, and mechanical stability of the micro-heater collectively affect the sensitivity, selectivity, lifetime, and reliability of the sensor. This review focuses on recent advances in micro-heater design over the past five years and examines how optimized designs impact sensor performance. Firstly, the gas-sensing mechanism of semiconductor materials and the influence of operating temperature on sensor performance are introduced. Based on this, the theoretical foundations of heat conduction, convection, and radiation in micro-heaters are presented, along with various modeling and optimization approaches. Secondly, recent research progress on the morphological and structural design of micro-heaters is elaborated, covering geometric configurations, thermal isolation structures, suspension beam optimization, and micro-hotplate arrays. The effects of these structural improvements on gas-sensing performance are also discussed. Subsequently, different materials used in micro-heater fabrication are reviewed, with an evaluation of their mechanical stability and electrothermal properties. Finally, the current research status and key performance parameters are summarized, and future research directions are outlined, providing insights

收稿日期: 2025-09-04 Received Date: 2025-09-04

* 基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202301120)、重庆理工大学科研启动基金项目(2023ZDZ020)资助

for enhancing semiconductor gas sensor performance through micro-heater optimization.

Keywords: MOS; gas sensor; MEMS; micro-heater; geometric structure; materials

0 引言

金属氧化物半导体 (metal oxide semiconductor, MOS) 气体传感器由于其成本低、微型化等优点被广泛应用于环境检测、污染物监测和医疗诊断等领域^[1], 工作温度一般为 200℃~500℃^[2]。工作温度对其气敏性能有着显著的影响, 不同工作温度下, 传感器对气体的响应特性有所不同。许多学者通过温度调制技术来获取传感器在不同工作温度下对气体的响应信息, 动态调控金属氧化物表面物种的吸附/脱附平衡与目标气体的活化路径, 提升 MOS 气体传感器的选择性、灵敏度并降低功耗, 实现单芯片的多气体检测功能^[3]。

近年来, 随着微机电系统 (micro electro mechanical system, MEMS) 技术和薄膜技术的发展, 气敏传感器也向着微结构型和多层型发展^[4]。而微加热器作为为半导体薄膜提供工作温度的重要器件, 其结构、材料等设计对于传感器的性能起着至关重要的作用^[5]。本文综述了近 5 年来 MEMS 气体传感器微加热器技术的最新进展, 以及微加热器设计对气体检测性能的影响, 虽然部分研究并未完全应用于 MOS 气体传感器领域, 但可以为传感器微加热器的设计提供参考。本文在简要介绍了微加热器基本结构和热损耗模型之后, 详细讨论了微加热器的形态设计和结构优化, 以及不同材料对微加热器功耗、温度分布以及结构稳定性等方面的影响。最后, 对研究现状进行了总结, 对其发展前景进行了展望。

1 MEMS 气体传感器原理和热损耗模型

1.1 基本结构

微纳加工技术的进步显著推动了 MEMS 气体传感器向微型化、低功耗方向发展。MEMS 气体传感器的典型结构和材料选择如图 1 所示, 其功能层构成包括:

1) 基底: 通常采用单晶硅作为机械支撑, 其优异的机械稳定性、热膨胀系数匹配性及半导体工艺兼容性可确保多层结构的集成可靠。

2) 支撑层: 其功能是将微加热器与基板隔离, 从而解决热串扰等难题。选用较低热导率材料可有效阻断热量向衬底泄漏, 减小器件功耗。

3) 微加热器层: 微加热器可以为气敏传感器提供必要的工作温度, 从而激活气敏材料的化学反应能力。加热器几何形态及材料等的设计与选取很大程度会影响传感器的性能、功耗及结构稳定性^[6]。

4) 绝缘层: 材料多为 SiO₂, 具有化学钝化、介电隔离、表面平坦化和热管理等多重协同作用, 保障了传感器核心功能层的物理稳定性、化学惰性与电学完整性^[7]。微加热器、绝缘层、支撑层及隔热空腔等共同构成的一体化微型加热平台称为微热板。

5) 传感电极层: 作为敏感材料与外部电路的导电界面, 传感电极将 MOS 薄膜因气体吸附产生的电阻变化无失真的送到外部电路, 同时提供机械支撑以维持材料层结构稳定性, 通过使用化学惰性材料确保传感器在高温及腐蚀性环境中的长期可靠。其几何设计如电极的指宽和间距比等可以进一步调控传感器的响应特性, 最终影响检测灵敏度与响应速度^[8]。

6) 敏感材料层: MOS 薄膜通过表面与目标气体发生选择性吸附和氧化还原反应, 引起自身电学特性的显著变化, 从而将气体浓度信息转化为可测电信号。其性能直接决定传感器的灵敏度、选择性及稳定性, 通过多孔薄膜或异质结等纳米结构修饰设计可优化气体扩散路径与活性位点^[9], 提升传感器性能。

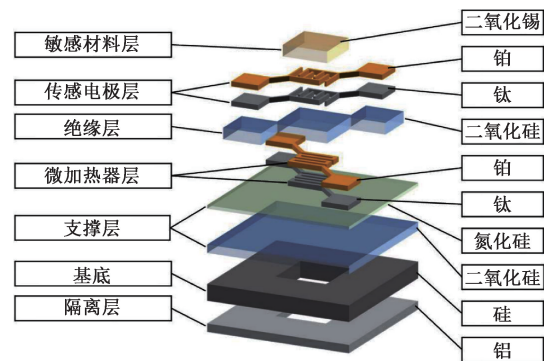


图 1 典型 MEMS 气体传感器结构

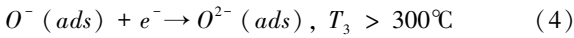
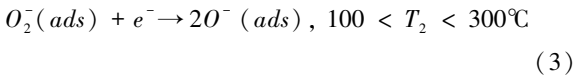
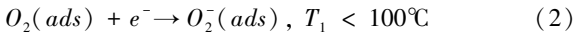
Fig. 1 Typical MEMS gas sensor structure

1.2 气敏机理

MOS 气体传感器基于 MOS 薄膜与气体分子相互作用引起的电阻变化来工作, 其核心机制可分为 3 个关键环节: 1) 当 MOS 薄膜 (以 N 型半导体为例) 被加热至工作温度时, 气体分子在薄膜表面发生物理/化学吸附, 并捕获导电电子, 形成带负电的氧离子, 同时产生电子耗尽层, 导致初始表面电阻升高; 2) 对于氧化型气体 (如 O₂ 等), 会从半导体夺取电子形成负离子吸附, 导致电子被消耗, 薄膜电阻升高。对于还原性气体 (如 CO、H₂ 等), 带负电的氧离子发生氧化反应, 释放被捕获的电子回到导带, 电子返回导致耗尽层变薄而使薄膜表面电阻下

降;3)传感器将电阻变化转换为电信号,经处理后输出,通过识别算法实现气体的定性与定量识别。

在不同的工作温度下,MOS传感器对气体的吸附能力不同,使其具备工作温度可调制特性。MOS表面吸附的氧分子在不同工作温度下会形成不同种类的氧离子(O_2^- 、 O^- 、 O^{2-})的吸附状态(adsorption state, ads)^[10]。根据气体吸附/解吸势能面的Lenard-Jones型描述,当温度 $<100^\circ\text{C}$ (T_1)时,大多数氧分子处于物理吸附状态;当温度介于 $100^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ (T_2)时,氧分子主要以 O_2^- 、 O^- 或 O^{2-} 形式的化学吸附,根据温度的不同存在差别。MOS薄膜的较高工作温度决定了其对气体分子主要是化学吸附,当吸附和解吸速率达到动态平衡时,薄膜趋于稳定,在达到约 300°C (T_3)的最佳温度附近时有最大吸附密度,此时传感器通常表现出最佳灵敏度。这些离子与目标气体的反应路径和速率不同,导致传感器表现出不同的响应,不同温度下电荷转移方程如式(1)~(4)所示。



微纳加工技术将MEMS气体传感器各功能层集成在毫米级芯片上,使器件以毫瓦级功耗实现高温激活。气敏机理进一步表明,只有将MOS薄膜精准控制在 $200^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ 的最佳灵敏度窗口,才能调控气敏薄膜表面化学吸附平衡,进而优化传感器的电阻响应。由此,传感性能与工作温度直接联系,而温度精度又由微加热器的电热、热力学性能决定。然而,在微米尺度下,热量通过传导、表面空气对流/辐射等多路径耗散导致实际温升远低于理想值且功耗激增。因此,下节首先建立了热传导、热对流、热辐射3类热损耗模型,为后续加热器几何与材料优化提供量化边界与理论依据。

1.3 热损耗模型

微热板的热损耗模型是MEMS气体传感器设计中的关键组成部分,加热器的功耗在传感器总功耗中占主导地位。如图2所示,微热板总热损为热传导、热对流、热辐射三者线性叠加。热传导是在无宏观物质运动的条件下,通过晶格振动或自由电子碰撞在固体、液体和气体内部传递热量的过程;热对流是一种依赖于气体流动的热传递方式;热辐射是物体因具有温度而以电磁波的形式向外发射能量的过程^[11]。

当微加热器输入功率等于向环境散失的总热功率时,微热板达到热平衡状态,由于MEMS气体传感器的气敏薄膜层对温度变化高度敏感,热平衡确保传感器在恒定温度下工作,避免温度波动导致的信号漂移。

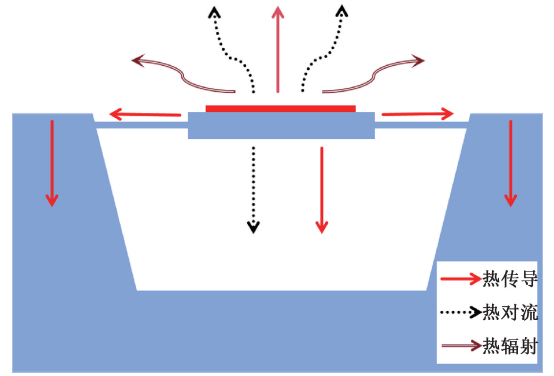


图2 微热板的热损耗模型

Fig.2 Thermal loss model of micro-heater

Lee等^[12]的研究表明,微加热器的电阻值(R_T)随温度的升高而线性增大,其变化由电阻温度系数(α)和初始电阻(R_0)决定。这一特性可用于估算加热器在工作时的平均温度,并根据能量守恒定律建立了一个热平衡模型如式(5)~(7)所示。

$$R_T = R_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (5)$$

$$P_{in} = I^2 R = P_{out} = P_C + P_V + P_R \quad (6)$$

$$P_{out} = a(T - T_0) + b(T - T_0)^2 + c(T^4 - T_0^4) \quad (7)$$

其中, P_{in} 为微加热器输入功率, P_{out} 为总热损耗功率, P_C 为薄膜的热传导, P_V 为微加热器与空气的对流, P_R 为热辐射, T 为微加热器的当前温度, T_0 为环境温度, a 、 b 、 c 均为物理常数。

Xu等^[13]在热传导、热对流、热辐射的基础之上增加了未知的热损耗,包括自由对流等其他因素,增加残余项后,不仅使模型分析更加准确,热分析从理想模型也跃升为可验证、可校准、可外推的实用工具。

对于不同设计的微加热器,其3种热损耗模型所占比例也有所不同。以悬臂梁结构微加热器在 300°C 左右温度时为例,热传导是主导的散热机制(约50%~80%),其中悬臂梁尺寸等结构设计对其占比具有决定性影响;热对流次之,占比约20%~45%,热对流损耗高度依赖于封装类型,当器件选择真空或封闭的低压下,由于分子数量急剧减少,对流损耗占比较小;根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律,辐射散热与温度的四次方成正比,在 300°C 时,其占比约为1%~5%。

传统封闭式MEMS气体传感器因响应速度慢、气体扩散受限等问题已逐渐无法满足现代检测需求,其技术局限性日益凸显。悬臂梁结构具有高热隔离效率、低热惯性、快速升降温以及可显著降低功耗等优点而被广泛应用于微热板的设计中^[14],诸多研究对悬臂梁结构的热损耗模型进行了研究,本文也主要以此结构进行综述。

1) 热传导

微加热器的热传导是其主要的热损耗方式,热量通

过支撑微加热器的悬臂梁向基底传导,由于这些悬梁的截面积较小,热传导损耗相对较低,从而实现了低功耗和高热效率。Yuan 等^[15]建立了悬臂梁结构热传导模型,并给出了热传导的计算如式(8)所示。

$$Q_{\text{conduction}} = \frac{2K_{\text{pt1}}A_{\text{pt1}}(T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})}{L} + \frac{4K_{\text{beam}}A_{\text{beam}}(T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})}{L} + \frac{2K_{\text{pt2}}A_{\text{pt2}}(T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})}{L} \quad (8)$$

其中, K_{pt1} 、 K_{beam} 、 K_{pt2} 分别是加热器、悬臂梁、传感电极的热导率, A_{pt1} 、 A_{beam} 、 A_{pt2} 分别是加热器、悬臂梁、传感电极的横截面积, L 是悬臂梁的长度, T_{hot} 和 T_{cold} 分别是微加热器温度和室温。

Xu 等^[13]在式(8)的基础之上引入基底的温度 T_{bulk} ,研究表明将支撑梁的数目由 4 根减小到 2 根可以将热传导损耗进一步减少约 44%。Huang 等^[16]从另一个角度分析热传导,引入材料密度、热导率、比热容和热源项推导了二维热传导方程。通过离散化处理,将连续的热传导方程转化为离散的代数方程,更精确捕捉面内温度梯度,显著缩减计算自由度。

2) 热对流

外部气体分子通过扩散效应进入传感器封装腔体,微加热器周围气体产生自然热对流。气体的流动会带走部分热量,从而影响微加热器的温度分布。热对流效率是指膜片通过对流散掉的热量占总热量的比例,较高的对流效率可使气体与膜换热更充分,进而提升传感器响应速度和灵敏度;但过高的对流效率可能会抬高所需加热功率、放大流速波动引起的基线漂移,造成温度均匀性下降。在计算微加热器通过对流散掉的热量时,需要用到热对流系数,因此准确获取该系数对微加热器和传感器的性能至关重要。

Zhao 等^[17]的结果表明,热对流损耗主要与空气的自然对流换热系数(h_f)和加热区域的温度差($T_{\text{hot}} - T_{\text{amb}}$)有关,并在此基础之上提出热对流损耗如式(9)~(11)所示。

$$Q_{\text{air}} = Q_{\text{cond}} + Q_{\text{conv}} \quad (9)$$

空气热传导损耗为:

$$Q_{\text{cond}} = \frac{4\pi\lambda_{\text{air}}(T_{\text{hot}} - T_{\text{amb}})}{1/r_i - 1/r_a} \quad (10)$$

空气对流换热损耗为:

$$Q_{\text{conv}} = Ah_f(T_{\text{hot}} - T_{\text{amb}}) \quad (11)$$

其中, Q_{air} 是对流热损耗, λ_{air} 是空气热导率(25℃时为 0.025 W/(m·℃)); h_f 是空气的自然对流换热系数(约 10 W/(m²·K)); r_i 和 r_a 分别是加热区域的有效半径和边界半径; A 是加热区域的有效面积。

Hu 等^[18]用 3-omega 方法建立了对流分析模型,通过求解该模型发现,微尺度下的对流系数明显大于宏观尺

度。Lahlalia 等^[19]提出了平均传热系数 h_m 的计算模型,该模型将对流换热分为空气流动和导热两部分,如式(12)~(14)所示。

$$h_m = \frac{k(T_m)}{l} \cdot 0.776(f_1(P_r)) \cdot (T_{\text{hot}} - T_a) \cdot g \cdot l^3)^{\frac{1}{5}} \quad (12)$$

$$f_1(P_r) = \frac{B_\infty}{v^2} P_r \cdot f_2(P_r) \quad (13)$$

$$f_2(P_r) = \left[1 + \left(\frac{0.332}{P_r} \right)^{\frac{11}{20}} \right]^{-\frac{20}{11}} \quad (14)$$

其中, P_r 为普朗特数, $k(T_m)$ 为空气在平均温度下的热导率, T_a 为环境温度, g 为重力加速度, B_∞ 为膨胀系数, v 为运动粘度。

Lahlalia 等^[20]引入 Nusselt 数、Rayleigh 数和 Prandtl 数等从另一个角度计算热对流系数。结果表明热对流系数和尺寸特征成反比,与 Nu 数和平均温度下的热导率成正比,这一研究将 Nu-Ra-Pr 无量纲关联移植到 MEMS 尺度,为传感器提供了结构尺寸/材料/温度三变量耦合的显式热对流系数预测工具。

3) 热辐射

热辐射可以通过斯特藩-玻尔兹曼定律计算,与加热器的材料以及工作温度有关^[21]。热辐射形式导致的热量损耗在总热量损耗中所占比例较小^[22]。Kim 等^[23]证明了对于微米级器件,当悬臂梁加热到 423℃时,热辐射导致的热损耗仅占悬臂梁总热量损耗的约 1%。通过在传感器背面涂覆一层具有低热辐射系数的金膜可以减少热辐射导致的热量损耗。Zhao 等^[17]推导得到的热辐射损耗如式(15)所示。

$$Q_{\text{rad}} = G_{\text{rad}} \sigma \varepsilon (T_{\text{hot}}^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (15)$$

其中, ε 为辐射系数, σ 为玻尔兹曼常数,结构几何系数为 $G_{\text{rad}} = A_s$,为加热区域的面积。通常,当温度 < 500℃ 且加热面积 < 0.5 mm 时,热辐射功耗通常可忽略不计。

2 微加热器的几何结构设计

在 MEMS 气体传感器微加热器设计中,几何结构设计指通过优化微加热器的物理形状、尺寸、排布方式及支撑结构等空间参数,实现对温度分布、功耗、响应速度及机械性能等的控制。

2.1 几何形态设计

为提高微加热器活性区域的温度均匀性,研究人员已探索了多种优化设计方法,一种常见的方法是在加热膜下放置多晶硅板^[24],或者在微加热器膜下使用厚硅岛^[25]。但是目前最常研究实现温度均匀性的方法是对加热器电极的几何形态进行设计^[26]。

1) 传统几何形态

如图3所示, MEMS微加热器的传统几何形态包括曲形、螺旋形、双螺旋形、环形等, 曲形设计结构简单, 极大简化了工艺复杂度, 通过增加折返路径可使热源分布更密集, 以减小相邻线段温差^[27]。此外, 几何结构对非规则布局区域和三维异形表面的匹配能力是曲形结构的核心优势, 例如在狭长流道等限制场景, 曲形形态可动态调整几何参数, 实现加热目标, 而螺旋形等对圆形/方形的区域适配形状较高, 但会提高边缘热损失或牺牲边缘分辨率。

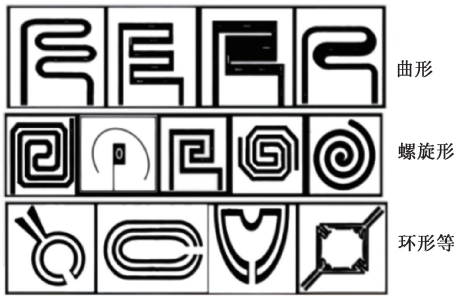


图3 传统的微加热器形态

Fig. 3 Characteristic curves of typical basic micro-heaters

螺旋形结构凭借中心对称的连续环绕路径, 能够实现更均匀的轴对称温度分布, 实验数据显示其中心区域与边缘温差比曲形结构降低约30%^[28]。同时, 闭合环路设计有效减少了电磁涡流损耗。此外, 螺旋形结构对

光刻工艺中的套刻误差更为敏感, 实际加工中的对准误差会导致性能波动增大。

曲形-螺旋组合形状在平衡温度分布和功耗方面具有一定的优越性^[29]。Bedoui等^[30]以微热板高于最高温度-40℃区域占比作为温度均匀性指标, 得出曲形设计温度均匀性为57.85, 功耗为58.44 mW; 螺旋形的温度均匀性为74.54, 功耗为74.54 mW; 曲折-螺旋组合形式的温度均匀性为63.14, 功耗为63.14 mW。相比之下, 曲形结构热均匀性和功耗最低; 螺旋形结构热均匀性和功耗最高; 曲形-螺旋组合形式结合了曲形和螺旋的优点, 在热均匀性和功耗方面提供一个平衡的选择。

环形加热器往往采用对称热场设计, 可有效降低温度梯度和增加活性区域面积。Zhao等^[17]使用环形加热器加热隔离槽设计和制备了NO₂传感器, 温度梯度从15.1%降到6.13%, 有效恒温区直径约为1 mm, 比曲形结构提高约30%。

此外, 其他形态如扇形、矩形和多孔结构也被引入微加热器电极形态的设计。Joy等^[31]的仿真结果表明, 在2 V输入的2D结构下, 曲形和多孔几何形状温度较高且功耗较低; 3D结构下, 多孔结构的最高温度为528.85℃, 功耗仅为40 mW。扇形结构可适配圆形区域, 但热场均匀性和边缘散热较差; 矩形结构空间利用率高, 但四角易过热, 需在设计中进一步优化; 多孔结构可降低功耗, 但工艺复杂、温度均匀性难以控制。选择合适的微加热器结构需要根据具体的应用需求和性能指标进行权衡, 传统几何形态各参数如表1所示。

表1 传统形态微加热器温度特性对比

Table 1 Comparative analysis of thermal characteristics for fundamental curves

形态	输入电压/V	最高温度/℃	功耗/mW	温度均匀性	参考文献
单曲形	5.0	107		低	[29]
双曲形	5.0	277		中	[29]
螺旋形	5.0	271		中	[29]
曲形-螺旋组合	5.0	369		高	[29]
单曲形	7.8	304	58.44	低	[30]
螺旋形	10.1	303	74.54	高	[30]
曲形-螺旋组合	8.6	305	63.14	中	[30]
扇形	2.0	407	110.00	低	[31]
多孔结构	2.0	529	145.00	高	[31]

2) 传统几何形态的优化

传统几何形态的优势在于结构规则、对称性好, 便于设计和制造^[32], 然而, 其劣势在于在某些区域产生热集中或散热过快的问题, 导致温度梯度较大, 影响传感器的响应速度和灵敏度。并且, 传统几何形态可能在优化热

效率和降低功耗方面的灵活性相对较低。因此, 诸多学者在此基础上对微加热器的形态做进一步优化, 以实现更好的性能。

双螺旋形态在MEMS微加热器中具有热场对称性好、电磁兼容性强和无电流聚集等优势, 但也存在空间适

配性差、边缘热损失大等局限性。为解决上述问题, Abdeslam 等^[33]利用有限元法在双螺旋加热器中心引入一个 $5\ \mu\text{m} \times 8\ \mu\text{m}$ 的椭圆形孔后, 活性区的温差 $< 15^\circ\text{C}$, 温度均匀性得到显著改善。器件升温至 300°C 时仅需约 $13.5\ \text{mW}$ 功耗, 远低于约 $33.8\ \text{mW}$ 的传统堆叠结构。该设计在保持高温度均匀性的同时实现了功耗的大幅降低。田姣姣等^[34]采用 $30/24/20\ \mu\text{m}$ 双螺旋渐变宽设计, 显著降低了约 $30\ \Omega$ 的整体电阻, 在 $3\ \text{V}$ 电压下即可升温至 687.7°C , 功耗仅 $120\ \text{mW}$ 。

在曲形微加热器中, 增加指条个数可在一定范围内提升温度均匀性, 却伴随功耗上升、响应变慢及可靠性下降的非线性权衡。Kharbanda 等^[35]设计并制作了两指/多指两种曲形加热器, 并在微加热器的 4 个角上设计了通孔实现了微加热器内部的电气连接。仿真和实验结果表明, 多指设计具有更好的加热性能, 采用通孔结构且多指形状时, 温差约为 40°C , 在温度达到 300°C 时功耗约为 $500\ \text{mW}$, 加热速率为约 $8^\circ\text{C}/\text{s}$, 冷却速率为 $5^\circ\text{C}/\text{s}$ 。Gaiardo 等^[36]在曲形指数研究基础之上对比了 3 种曲形在 $18\% \sim 95\%$ 不同膜面积占比的微加热器布局。实验和理论研究表明较低的占比虽然具有较低的功耗, 但稳定性最差, 高占比则反之, $32\% \sim 69\%$ 的占比可兼顾功耗与强度。

Yang 等^[37]将环形加热器和渐变宽设计进行了结合, 提出了两种以 $100\ \mu\text{m}$ 为半径, $35/25/15/5$ 和 $20/10/5\ \mu\text{m}$ 梯度渐变宽环形加热器, 并与固定 $5\ \mu\text{m}$ 宽度形态进行比较, 仿真结果表明, 两种渐变宽形态都优化了加热功率密度分布, 显著提高了微型板的温度均匀性, $20/10/5\ \mu\text{m}$ 变宽形态在 300°C 工作温度下, 超过 70% 的加热区域温度梯度 $< 10^\circ\text{C}$, 在 450°C 时 $20/10/5\ \mu\text{m}$ 设计比 $35/25/15/5\ \mu\text{m}$ 设计多出 $0.018\ \mu\text{m}$ 的机械形变, 占前者加热器总机械变形的 30.5% 。

此外, 通过在加热器边缘引高阻结构, 主动补偿因硅基底高热导率造成的边缘热对流、热传导的损失, 可使膜面温度分布更均匀, 温差更低。Lu 等^[38]设计并制作了具有热补偿结构的聚硅膜微加热器, 在电阻加热器边缘引入一系列 S 形补偿结构, 实现了 73.8% 的 T_{90} 区域覆盖和 $70.8\ \text{mW}$ 的低功耗并达到最佳平衡, T_{90} 区域相比传统平面结构提升了 3 倍以上。加热器最高温度为 397.6°C , 热响应恢复时间为 $17/32\ \text{ms}$; 膜片热膨胀 $0.12\ \mu\text{m}$, 中心应力降至 $64\ \text{MPa}$ 。

3) 空间填充分形曲线

分形曲线因自相似与无限复杂度的数学本质, 在任意尺度下呈现与整体一致的几何特征。这一特性赋予其超大比表面积、高空间利用率、空间均匀性及可扩展拓扑等优势, 已广泛应用于数学、医学与工程等领域。其中空间填充分形曲线已引入微加热器电极形态的设计^[39], 其

空间填充特性可概括为: 无限次迭代的情况下一条曲线可以布满整个平面。空间填充分形曲线的分形维数为 2, 大于传统欧氏几何中曲线的维数 1, 与欧氏几何中平面的维数 2 相等^[40]。分形曲线的形成是基于一个不断迭代的过程, 以经典的希尔伯特分形曲线为例, 曲线的基础元素有 4 个, 开口方向不同的“U”形。要构造 n 阶的希尔伯特曲线, 先构造 4 个 $n-1$ 阶的希尔伯特曲线, 这 4 个 $n-1$ 阶的希尔伯特曲线通过特定的顺序连接起来。假设线段的长度为 L , n 阶希尔伯特曲线的长度如式(16)所示。

$$H_n = 4^{n-1}(H_1 + L) - L \quad (16)$$

具体到微加热器设计, 假设分形结构的迭代次数为 n , 电极的厚度为 h , 电极的宽度和间隙为 a , 则希尔伯特电极结构的表面积如式(17)所示。

$$S = \left(\frac{14}{5} 4^n + 2 + \frac{(-1)^n}{5} \right) ah \quad (17)$$

由此可以看出, 当分形曲线的迭代次数变多时, 分形曲线长度成指数倍增长, 在有限的空间内提供了更大的比表面积, 显著提升热均匀性, 但更长的曲线长度意味着更精细的布局, 极大的增加了加工难度和生产成本。此外, 表面积扩大使传导与辐射损耗路径增多, 对流占比仍低但绝对损耗略增。2~3 次迭代后, 导线总长度相对增量趋缓, 电阻增幅减小, 功耗下降随之饱和, 温度均匀性虽继续改善, 但幅度逐步放缓。与此同时, 沟槽加密导致电极有效截面惯性矩减小, 宏观刚度下降, 热应力集中点增多。综合考虑性能、工艺、可靠性, 大多研究聚焦在三阶到四阶分形曲线。

在微加热器的设计中, 分形曲线相较传统曲线结构表现出热场更均匀、热效率更高、功率密度更大等显著优势^[41], 并能通过多阶迭代灵活扩展, 同时缓解热应力集中等问题, 特别适用于对温度均匀性和功耗敏感的气体传感器场景。不同迭代次数的希尔伯特空间填充分形曲线如图 4 所示。

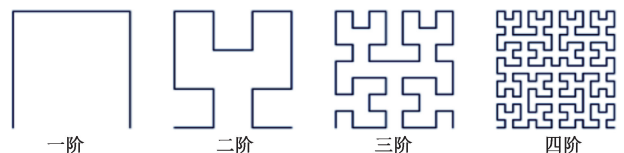


图 4 不同迭代次数的希尔伯特曲线

Fig. 4 Hilbert curves with different iteration numbers

经典的空间填充分形曲线包括皮亚诺曲线、希尔伯特曲线和摩尔曲线等。Xu 等^[14]经仿真所设计的皮亚诺形微加热器相较于传统的螺旋形微加热器在 $2\ \text{V}$ 的驱动电压下能够达到 105.85°C (螺旋形为 96.85°C), 加热效率更高。其温度分布也更均匀, 能覆盖超过 75% 的有效加热区域, 且最高温度区域占比超过 90% 。同样, Xu

等^[42]经仿真分析所设计的皮亚诺形微加热器在 5 V 的驱动电压下表面温度可达 386.85℃(螺旋形为 352℃),此外,还对比了 6 种不同微加热器占不同膜面积比例的皮亚诺形微热板,在占比为 49%时,温度最高且分布最优。

分形曲线的迭代次数对 MEMS 气体传感器加热电极的性能有显著影响。合适的分形曲线和迭代次数设计对性能和成本的考量具有重要意义。Charan 等^[43]通过仿真研究了不同迭代次数的皮亚诺、希尔伯特和摩尔曲线形态微加热器的性能,并将其与传统的双螺旋加热器进行了比较,所有几何形态保持 2 W 的恒定功率。研究表明,针对不同需求应选择不同的曲线和迭代次数,如需最小化成本,三阶希尔伯特/摩尔曲线或二阶皮亚诺曲线是理想选择,其温度均匀性与双螺旋设计相近,但金属用量减少近半;若温度均匀性至关重要,可采用三阶皮亚诺曲线,但其电极长度显著长于其他分形结构;如需兼顾温度

和成本两种特性,四阶希尔伯特/摩尔曲线能提供较优的折中方案。分形设计通过缩放曲线阶数与线宽,可适配不同尺寸的传感芯片,在阵列式气体传感器设计上可实现多通道同步检测并保持各通道热一致性。

综上所述,MEMS 微加热器的几何结构设计已从简单的曲/螺旋形态演进到渐变线宽、热补偿设计、分形曲线等多维优化体系。传统形态规则易制,但存在热集中或边缘过冷;在中心开孔、线宽渐变、热补偿环等局部改进后,可在 13.5~120 mW 内将活性区温差压缩至 0℃~35℃,功耗较旧结构下降 50%以上。分形曲线凭借空间填充、自相似与高比表面积特性,把电极长度和散热路径指数级展开,三阶到四阶希尔伯特/皮亚诺既能将金属用量减半,又可使有效加热区温度不均匀性趋近于 0,成为兼顾低功耗、高均匀、加工难度和成本、阵列可扩展性的主流方向。形态优化的微加热器各参数如表 2 所示。

表 2 形态优化的微加热器温度特性对比

Table 2 Comparison of temperature characteristics of new curves

形状	活性区面积	输入电压/V	中心-边缘温差/℃	工作温度/℃	功率/mW	参考文献
中心椭圆孔螺旋形	240 μm^2	2.0	<15	300.00	13.5	[33]
渐变宽双螺旋形	333 μm^2	3.2	≤ 50	687.70	120	[34]
带孔曲形	2.5 mm^2	6.0	≈ 40	300.00	≈ 500	[35]
18%膜占比曲形	0.15 mm^2	3.0	≈ 25	400.00	≈ 50	[36]
25%膜占比曲形	0.56 mm^2	3.2	≈ 20	400.00	≈ 60	[36]
渐变宽环形	100 μm^2	≈ 2	≈ 10	300.00	≈ 28	[37]
S形热补偿并联形	1 mm^2	3.8	50	397.60	70.8	[38]
皮亚诺曲线	0.04 mm^2	2.0		105.85		[14]
皮亚诺曲线	120 μm^2	5.0		386.85		[42]
希尔伯特三阶曲线	30 mm^2		185.71	285.19	2 000	[43]
希尔伯特四阶曲线	30 mm^2		75.02	222.18	2 000	[43]
摩尔三阶曲线	30 mm^2		182.80	281.65	2 000	[43]
摩尔四阶曲线	30 mm^2		73.22	219.73	2 000	[43]
皮亚诺二阶曲线	30 mm^2		123.19	254.75	2 000	[43]
皮亚诺三阶曲线	30 mm^2		67.47	157.41	2 000	[43]

2.2 几何参数设计

在几何形状确定的前提下,线宽、厚度、线间距以及支撑间隙等几何参数的优化同样关键。这些参数不仅直接决定加热效率、温度均匀性和功耗,还能显著平衡热应力分布与结构可靠性。因此,针对微加热器相同构型的几何参数精确调优,已成为提升 MEMS 气体传感器性能的重要方向之一,并为实现低功耗、高响应与长期稳定性提供了新的技术路径。

1) 电极宽度

微加热器电极宽度是 MEMS 气体传感器的关键几何参数。线宽减小使单位面积电阻增大,在恒流驱动下可提升功率密度与局部温度,但伴随热应力集中和电迁移风险^[44];增大线宽则降低单位面积电阻,有利于温度均匀性与工艺可靠性,却牺牲调制灵活性并增大热容,导致响应变慢。优化线宽需综合权衡电热性能、机械可靠性及工艺极限,以实现目标温度分布、能耗效率和气体灵敏度的最佳匹配^[45]。

Wei 等^[46]固定加热器间隙,将加热器电极宽度从

50 μm 逐步减小至 10 μm , 仿真分析表明当宽度为 50 μm 时, 温度分布更加均匀, 同时电阻降至约 100 Ω ; 而加热器宽度 < 30 μm 时, 中心区域温度均匀性显著降低, 导致局部热点或冷点的出现。Wang 等^[47] 研究了不同宽度的多指电极形态, 将电极宽度从 250 μm 增加到 900 μm , 研究表明电阻与宽度呈反比关系。当宽度为 500 μm 时, 不同电压下微加热器的温度响应时间均 < 3 s。此外, 由于曲形加热器拐角处的热聚集效应和狭窄电流通道, 四指电极在宽度 > 700 μm 时电阻急剧增加; 500 μm 宽度的电极在 15 V 输入电压下温度分布更均匀, 二指电极的温度为 37.5 $^{\circ}\text{C}$, 而四指电极降至 34.5 $^{\circ}\text{C}$ 。

一些学者在将分形形态引入微加热器设计的基础上, 研究了其宽度对加热性能的影响。Xu 等^[42] 通过仿真对比了 6 和 12 μm 两种宽度下传统旋形和皮亚诺形微

加热器的性能, 在 6 μm 电极宽度、5 V 驱动条件下, 微加热器表面达到 386.5 $^{\circ}\text{C}$ 的最高温度, 然而其温度均匀性低于 12 μm 宽度设计。

综上所述, 在 250~900 μm 实验窗口内, 500 μm 线宽可在毫秒级响应内获得均匀温度场、抑制局部热点与材料退化, 并把电阻维持在百欧姆量级, 实现低功耗驱动; 但当线宽缩至 30 μm 以下或 700 μm 以上(多指结构)时, 均会因热聚集、电流拥堵或散热冗余而引发均匀性恶化、电阻陡增与应力集中。分形与多指拓扑进一步表明, 在相同电压驱动条件下, 宽度-形态协同优化比单纯改变尺寸更能兼顾高温效率与温度一致性。此外, 线宽设计还需分别讨论其在拐角等特殊位置造成的影响, 这种影响在如皮亚诺等具有较多拐角的形态尤其值得讨论, 不同电极宽度设计的微加热器参数如表 3 所示。

表 3 不同电极宽度微加热器参数

Table 3 Parameters of micro-heaters with different electrode widths

形态类型	线宽范围/ μm	尺寸	最优线宽/ μm	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	功率/mW	温度均匀性	参考文献
皮亚诺分形形态	1~6	120 μm × 120 μm	6	386.85		高	[43]
螺旋形	1~6	120 μm × 120 μm	6	351.85		中	[43]
环形	10~50	400 μm × 400 μm	30	350.00	35.2	$\Delta T < 5^{\circ}\text{C}$	[46]
曲形	10~50	400 μm × 400 μm	30	290.00	35.2	$\Delta T \sim 10^{\circ}\text{C}$	[46]
二指曲形	250~900	2 cm × 2 cm	500	77.00	880.0	高	[47]
三指曲形	250~900	2 cm × 2 cm	500	65.00	540.0	中	[47]
四指曲形	250~900	2 cm × 2 cm	500	54.00	360.0	低	[47]

2) 电极间隙

适当的电极间隙设计可优化热场分布, 确保传感材料均匀加热, 从而提高灵敏度和稳定性^[45]。间隙过小可能导致热串扰加剧, 增加功耗和残余应力/热应力; 而间隙过大则会减弱热传导效率, 导致温度分布不均和热响应速度下降。此外, 电极间隙还影响电场分布, 进而调控气体分子与敏感材料的吸附-脱附动力学。通过优化间隙尺寸, 可在低功耗、快速响应和高灵敏度之间取得最佳平衡, 提升传感器整体性能。

Yuan 等^[15] 制作了 10、15、20 μm 这 3 种间隙分布的微加热器, 仿真和实验结果表明, 在 1 V 加热电压下, 10 μm 间隙结构最大表面温度为 215 $^{\circ}\text{C}$, 温度分布在核心区域较为均匀, 而 20 和 15 μm 结构最大表面温度为 197 $^{\circ}\text{C}$ 和 212 $^{\circ}\text{C}$, 且 10 μm 间隙结构最大热应力为 0.072 GPa, 可以以 28.6 mW 的加热功率高达 357.5 $^{\circ}\text{C}$, 响应时间为 5 ms。Wei 等^[46] 仿真研究表明, 保持加热功率为 41 mW, 当间隙大于或小于 30 μm 时, 中心的高温分布开始变得不均匀。具有 30 μm 宽度和间隙的加热器不仅可以实现 300 $^{\circ}\text{C}$ 的均匀高温, 而且还可以使高温区域的直径接近

800 μm , 间隙优化后, 机械变形仅为 0.132 μm , 占总厚度的 6.58%。Yang 等^[37] 仿真研究表明, 当加热器间隙超过 120 μm 时, 中央区域表现出更平滑的温度形态。当间距降低至 80 μm 以下, 局部热点出现在微型板的中央区域中。Calderon-Gonzalez 等^[48] 经仿真分析得到减小加热电极间隙至 2 μm 可显著改善微热板的温度均匀性这一规律, 温度均匀性系数 (coefficient of variation, CV) 接近 0.95 时, 可有效避免热点与冷区; 而 100 μm 的间隙会导致热分布不均 CV 系数显著下降至 0.75, 降低传感器的一致性。不同电极间隙微加热器的参数对比如表 4 所示。

3) 电极厚度

微加热器的电极厚度同样是影响传感器性能的关键参数之一^[49]。较薄的微加热器具有低热容和低热损耗特性, 可实现毫秒级响应和低功耗运行, 有利于提升传感器的动态响应性能。但过薄的结构可能导致机械强度不足和温度均匀性变差。较厚的微加热器虽然机械稳定性更好, 但热惯性增大, 导致响应速度降低且功耗显著增加。通过优化厚度设计, 可在机械稳定性、热响应速度和功耗之间取得平衡。

表4 不同电极间隙微加热器参数

Table 4 Parameters of micro-heaters with varied electrode gaps

形态形状	间隙/ μm	最大温度/ $^{\circ}\text{C}$	温度均匀性	热应力/变形	功率/ mW	参考文献
曲形	10	215	低	0.072 GPa		
	15	212	高	0.067 GPa	28.60	[15]
	20	197	低	0.700 GPa		
环形	60	~440	低	0.055 μm	42.19	
	120	~381	高	0.044 μm	38.11	[37]
	140	~375	中	0.042 μm	37.07	
双螺旋形	10	~317	低			
	30	~327	高	0.132 μm	41.00	[46]
	50	~328	低			
曲形	2	~250	高		20.00	
	30	~235	中		23.00	[48]
	110	~210	低		25.00	

Bandewad 等^[49]对 100~500 nm 范围内 8 种电极厚度进行了系统仿真,研究表明将曲形 Pt 微加热器厚度控制在 100 nm 时,可在 49 μW 功耗下获得 693 $^{\circ}\text{C}$ 的均匀高温,厚度增加功耗显著上升,但温升略降。Yang 等^[37]的仿真研究表明,随着电极厚度的增加,微加热器的温度呈近似线性增加,当电极厚度为 0.4 μm 时,微加热器温度可达 466 $^{\circ}\text{C}$,机械形变为 0.072 μm 。当电极厚度为 0.2 μm 时,温度为 381 $^{\circ}\text{C}$ 且在半径为 100 μm 的加热区

域内,超过 70% 的区域温度梯度 < 10 $^{\circ}\text{C}$,机械形变为 0.034 μm 。Zhang 等^[50]模拟了 100~300 nm 不同厚度的 Pt 微加热器。100/300 nm 厚度的峰值温度分别为 104.98/103.19 $^{\circ}\text{C}$; 100/300 nm 的最大位移为 0.30/0.47 μm 。增加厚度对其峰值温度的影响较小但最大位移激增。较小的位移意味着悬臂结构的机械稳定性更高,减少了因热膨胀导致的结构损坏风险。不同微加热器电极厚度的参数对比如表 5 所示。

表5 不同电极厚度微加热器参数

Table 5 Parameters of micro-heaters with different electrode thicknesses

厚度范围	形态	厚度/ μm	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	功耗/ mW	机械形变/ μm	参考文献
0.1~0.4 μm	渐变宽环形	0.2	381.00		0.034	
	渐变宽环形	0.4	466.00		0.072	[37]
0.1~0.5 μm	曲形	0.1	692.85	0.04		
	曲形	0.5	687.85	0.24		[49]
100/200/300 nm	曲形	0.1	104.98		0.300	
	曲形	0.3	103.19	26.00	>0.300	[50]

综上所述,微加热器的电极厚度是其性能的关键设计参数;较薄的电极(如 100 nm)能实现更低的功耗和更优的机械稳定性,但可能引入串扰问题;随着厚度增加,功耗和机械应力会显著上升。在 100~200 nm 的厚度范围内,可以在高温、低功耗和结构稳定性之间取得最佳平衡,是兼顾器件性能与能效的理想选择。

2.3 结构优化

在微加热器的性能优化研究中,除了几何形态的设计外,新型悬挂结构设计、阵列化集成等研究已成为关键

突破方向。悬臂梁与悬挂膜结构通过减小热传导面积并优化热场分布,显著降低器件功耗至毫瓦级,同时提升温度均匀性与响应速率^[51]。传感器阵列化通过多通道独立控温与气敏材料的空间集成可实现多气体检测并降低功耗^[52],而异质介质膜的叠层设计通过光/热催化层与敏感层的物理分离,抑制电子干扰并实现气体预筛选,解决了传统接触式叠层的选择性劣化问题^[53]。

1) 悬挂结构优化

传统悬空膜型微热板由 SiO_2 薄膜、细长桥臂、背面

空腔及硅基底构成,通过薄膜-桥臂-空腔-基底实现热隔离与低功耗。虽通过背面蚀刻空腔降低热损实现约 340 mW 的功率下可将微热板加热至 240℃,却因细长支撑梁存在机械脆弱性和温度梯度大等缺陷^[54];而封闭膜型依赖 SiO₂/Si₃N₄(氮化硅)多层堆叠缓解应力,但固体介质的高热导率导致功耗激增,且工艺复杂性制约了集成潜力^[55],悬挂结构的多方面的优化可突破上述瓶颈。

通过优化悬臂梁设计在很大程度上也可以提升传感器性能,悬臂梁越“长薄窄”、电阻层越远离中性轴,热弯矩与温升越大,但结构刚度与强度下降;通过调节悬臂梁几何参数,可优化其在电热激励下的热致位移灵敏度和微热板的温度分布性能。

Algamili 等^[56]制作了 200~400 μm 可调悬臂梁结构 TiO₂ 传感器,通过调整涂层厚度实现了对丙酮的高灵敏度检测。0.1 V 加热电压下,200 μm 长度下悬梁位移为 0.022 7 μm,热应力为 29.645 1 nN;1 V 加热电压下,400 μm 长度下悬梁位移为 14.897 8 μm,热应力为 11 679.611 2 nN。Ma 等^[57]通过仿真分析了悬臂梁宽度范围从 1~201 μm 的微热板,结果表明当悬臂梁宽度为 151 μm,结构热变形最小,最大位移约 0.2 μm,结构稳定性最佳。过窄的悬臂梁易致热应力集中,过宽会增加热损失,降低温度均匀性。

Xie 等^[58]设计了一种基于单悬臂梁结构的金属氧化物半导体气体传感器,悬臂梁宽度为 10 μm。测试结果表明,加热至 400℃ 时仅为 2.96 mW,升温时间仅为 260 μs。该设计通过悬臂梁结构极大地减小了加热区域的热质量和热损失路径,从而实现了超低功耗和快速热响应。此外,得益于悬臂梁与焊盘分离的设计,在 1 mm²

的芯片内可集成 10 个传感器,显著提高了集成度。

此外,多层复合膜结构利用低热导率材料堆叠可提高热隔离性,通过应力补偿等方式可实现机械强度的提升。Ma 等^[57]设计了由 SiO₂(0.5 μm)和 Si₃N₄(1 μm)复合膜构成的悬臂梁,在温度均匀性、机械稳定性、低应力之间取得最佳平衡。Zhang 等^[59]采用氧化物/氮化物/氧化物(300/500/300 nm)结构作为悬臂梁支撑层,平衡了热隔离和机械强度,在 30 mW 功耗下,微热板中心区域温度可达 300℃。Jeong 等^[60]通过将 Pt 电极嵌入到两层 Al₂O₃ 薄膜之间,提升了 Ga₂O₃ 传感器的气敏性能,650℃ 下功耗 38 mW,在 2×10⁻⁴ 浓度下,对 CO 和 NO₂ 的灵敏度分别为 0.97 和 1.06,Al₂O₃ 悬臂梁结构将高温寿命从秒级提升至百小时级,同时保持低功耗和互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)兼容性。

Thomas 等^[61]制作了一体式、悬空、全金刚石微热板,温度上限突破 2 458℃,远高于传统悬臂式热板,加热时间常数为 1.4±0.1 ms,冷却时间常数为 1.4±0.4 ms,热导率约为 90~101 W/m·K,介于 SiO₂ 与 Si 之间,兼顾热均匀性与能耗控制。虽然其极高的温度目前无法与 MOS 气体传感器相匹配,但其设计对未来 MEMS 气体传感器从多层堆叠到一体化结构具有潜在意义。

新型支撑结构如多梁结构和网状结构的设计提升了温度均匀性,并降低了功耗。悬臂梁的宽度和可调性优化对机械结构强度非常有利,一体式打造可从根本上解决传统悬臂梁的缺点,大幅提升了温度上限和响应速率。此外多层复合膜结构设计工艺兼容性好,可集成敏感层与加热器,成为未来研究的方向。悬臂梁结构优化的微加热器参数如表 6 所示。

表 6 悬臂梁结构优化的微加热器

Table 6 Micro-heater with an optimized cantilever structure

核心创新	悬臂梁材料	关键性能	优势	参考文献
采用电热驱动与可调悬臂梁结构	多晶硅/金	位移:0.022 7~14.897 8 μm	基于标准 PolyMUMPs 工艺,易于制造集成	[56]
悬臂梁宽度优化	二氧化硅/氮化硅/铂	三温区温差=100℃机械变形小	低功耗、结构稳定性好	[57]
无线圈的极筒铂微加热器	硅/二氧化硅/氮化硅	2.96 mW (400℃) 260 μs 升温时间	热损失路径低、空间利用率高	[58]
氧化物-氮化物-氧化物三层结构	二氧化硅/氮化硅/二氧化硅	30 mW/300℃ 热均匀性佳	机械强度高,兼容晶圆级封装	[59]
氧化铝-铂-氧化铝三层结构	氧化铝/铂/氧化铝	530℃循环 5 万次电阻变化<1.3%	耐高温、长寿命、低热损耗	[60]
单层硼掺杂多晶金刚石结构速热响应	单层硼掺杂多晶金刚石	最高工作温度 2 458℃ 功耗<100 mW	超高工作温度、快速热响应 与均匀加热	[61]

2) 隔热结构

MEMS 气体传感器的隔热槽是一种微结构设计,主要用于减少传感器内部热量的横向传导,确保加热区域

的热量集中,降低功耗并提高检测灵敏度。通过微加工技术在硅基底上刻蚀出隔离沟槽或空腔,隔热槽能有效阻断热扩散,维持传感元件的温度稳定性,从而提升传感

器的响应速度和准确性。Zhao等^[17]在微加热器周围设计了环形隔热槽以降低功耗,提高热响应率,仿真结果表明热隔离后温度梯度从15.1%降至6.13%,94℃时功耗降至150 mW。

减少热量向衬底流失以提高加热效率并降低功耗的方法除了增加热隔离槽外,更多采用热隔离间隙^[62]。Chen等^[63]通过在微加热器和硅基底之间创建一个空气间隙,通过4根细长的支撑梁与基底连接,显著减少了热传导损耗。微加热器在约400℃工作温度时,功耗仅为39 mW,沿对角线方向的温度梯度仅为0.03℃/μm。Hsieh等^[64]通过在硅基底正面与背面进行刻蚀形成悬空膜结构,实现了传感器气敏性能的优化。该悬空膜结构实现了优异的热隔离,使微加热器在达到200℃的最佳工作温度时,功耗降低至148 mW。在气敏性能方面,传感器对甲硫醇气体表现出高响应特性,在 5×10^{-6} 的浓度下的响应值达到2.42,响应/恢复时间为3/12 s,显示出快速检测与恢复能力。Wei等^[65]提出了一种基于玻璃衬底的新型微热板结构,通过引入腔体与热隔离间隙的复合热隔离结构大幅提升热效率。该

设计在500 μm厚的玻璃基底上蚀刻出深度为495 μm的腔体,形成仅5 μm厚的支撑结构,并在此支撑层中嵌入了100 μm宽的热隔离间隙。该结构利用空气的低导热特性有效阻断了横向热传导路径,显著降低了热损失。仿真结果表明,在加热面积为340 μm×340 μm时,微热板在达到300℃工作温度下的功耗仅为11.7 mW,相较于无热隔离间隙的器件降低了30.2%。同时,有效加热区内的温度梯度低至0.18℃/μm,展现出优异的热均匀性。

MEMS传感器的热管理技术经历了从隔热槽到热隔离间隙的持续优化过程。早期的隔热槽设计通过在硅基底刻蚀沟槽来阻断横向热传导,虽能改善温度梯度但仍存在热损失较大的问题。随着技术进步,热隔离间隙设计利用空气的超低热导率特性,通过悬空结构或深腔刻蚀实现更高效的热隔离。这种改进使功耗从瓦级降至毫瓦级,同时提升了温度均匀性和响应速度。最新的复合结构结合了腔体与隔离间隙的优势,通过多尺度优化实现了超低功耗与快速响应的完美平衡,不同隔热结构设计如表7所示。

表7 隔热结构设计

Table 7 Thermal insulation structure design

热隔离结构	工作温度/℃	功耗/mW	温度梯度	检测气体	气体浓度/ $\times 10^{-6}$	响应/恢复时间	参考文献
环形热隔离槽	94	150.0	由15.10%降至6.13%	二氧化氮	1~100	180 s/10 min (94℃, 2×10^{-6})	[17]
背面刻蚀形成悬空膜和四支撑梁	400	39.0	0.03℃/μm	乙醇	1~25	17.6 s/16.7 s (400℃)	[63]
双面刻蚀形成悬空膜	200	148.0		甲硫醇	0.04~25	3 s/12 s (200℃, 5×10^{-6})	[64]
深腔体和热隔离间隙	300	11.7	0.18℃/μm				[65]

3) 微加热阵列

MEMS技术为小型化、低功耗阵列集成提供了机会,利用MEMS技术在单片芯片上进行传感器的集成是最简单的一种方式。由于基于单个气体传感器几乎不可能对混合气体进行定性和定量检测,传感器阵列集成则是能实现混合气体的有效定性或定量识别的主要方式之一^[62]。

诸多研究聚焦于单个微加热器的优化,而随着集成需求的提升,双加热器的出现实现了多区域独立温控,提升了多气体检测能力,并降低单加热器功耗。Yang等^[66]提出一种基于热串扰的双加热器微热板设计,仿真得出在300℃工作温度下,相比单加热器微热板功耗降低约27%,热效率从4.10提升至2.99 mW/(mm²·℃),同时保持低机械变形<0.24 μm。Yang^[37]利用热串扰效

应的双加热器微热板在300℃下总功耗仅23.69 mW,比单加热器节省4.68 mW(16.5%),借助渐变电极与背腔刻蚀窗口实现>70%区域温差<10℃的高均匀性和0.02 μm的低机械变形,并可扩展为三加热器阵列。

双微加热器设计虽可实现多气体检测,但其仅支持高/低两种温度,更多数量的微加热器可实现更精细的多气体检测和更强的容错能力^[67]。Zhang等^[50]集成了3个独立温控的微加热板,通过优化地线宽度将电串扰电势降至0.058 V,并减薄Pt电极厚度至100 nm降低了机械应力(1.78×10^8 N/m²)和位移(0.3 μm)。该设计将集成密度提升3倍,解决了传统传感器空间跨度大导致的检测误差问题。Ma等^[57]仿真设计了单芯片上形成高温、中温(~500℃)、低温3个区域三微加热阵列,相邻温区温差为100℃,区间热串扰<8℃,结构位移<0.2 μm。

为进一步提高集成密度和热效率,研究者们开始探索多边形共享分布式微加热器^[68]。这种从单元数量增加到几何构型优化的演进,不仅使单一微热板即可提供多温度响应,还通过多边形闭环热流路径将热量锁定在4条边缘,显著降低热扩散损失,进而对气体检测灵敏度的优化开辟了新路径^[69]。Liu等^[70]仿真并制作了一种基于SnO₂的四边形气体传感器,采用不同的金属线宽(4、7、12、6 μm)作为微加热器设计。为激发不同气体在不同温度下的选择性响应,通过设计加热线宽度梯度引入的温度调制机制,仿真结果表明4条通道之间形成50℃~110℃的显著温差而每个通道内部温差控制在2℃以内,确保了响应的稳定性和可重复性。红外图像显示热量集中在4条边缘,中央支撑梁温度较低,验证了热场分布仿真的准确性。四边形气体传感器在29.90 mW的静态功耗下,可同时工作于195℃~417℃的不同温度,并实现对6类不同气体和食

品稳定的识别与检测。Xue等^[71]采用T型悬臂式单条微加热器,水平轴上实现4个气体检测通道,当施加1.2 V电压时,通道1、2和通道3、4的温度分别为285℃和350℃;当施加1.6 V电压时,通道1、2和通道3、4的温度分别为350℃和450℃;该传感器在在1.2 V电压下,对 4×10^{-5} 的NO₂的响应达1.7,功耗13.72 mW;在1.4 V下,对 4×10^{-4} 的NH₃的响应为2.5,功耗17.64 mW;在1.6 V下,对 1×10^{-4} 的CO的响应为3,对 4×10^{-4} 的H₂的响应为4,功耗均为21.92 mW。此外,多层膜残余应力在-52.59~34.07 MPa,机械稳定性良好。Xie等^[72]设计并制作了一个集成6个传感通道共享式铂基微加热器,结合MEMS工艺与SnO₂溅射,在3.0 V电压下总功耗仅35.1 mW,单通道平均功耗低至5.85 mW,对乙醇最高响应达16.93,成功实现低功耗、高灵敏度的六通道同步气体检测。各加热阵列设计的参数如表8所示。

表8 微加热器阵列设计
Table 8 Micro-heater array design

阵列结构	通道数	检测气体	总功耗/mW, 工作温度/℃	响应/恢复时间	最大变形/μm, 工作温度/℃	参考文献
双热板设计微加热器阵列	2		8.96,300	10 ms/-	0.234,300	[66]
双工作区共享悬臂结构	2		23.70,300	-/10.3 ms	0.234,300	[37]
单悬臂区集成三独立热板	3		26.00,103		0.300,103	[50]
三温区微加热器阵列	3	一氧化碳			0.240,901	[57]
四边形单加热器集成四通道	4	三甲胺	29.9,297	60/120s	[70]	
		乙醇		15/45 s		
		硫化氢		25/80 s		
		氨气		20/50 s		
		乙酸乙酯		25/30 s		
T型悬臂单条微加热器	4	甲醛	30/60 s	[71]		
		二氧化氮	13.7,285			
		氨气	17.6,330			
		一氧化碳	21.9,400			
六边形单加热器集成六通道	6	氢气	21.9,400	[72]		
		乙醇	35.1,380			

目前微加热阵列的设计主要由共享分布式和多加热器式两种设计组成,可实现多气体检测这一需求,但在某些方面还是存在差异。多个微加热器,可以独立控制不同温度,提高灵活性,共享分布式设计则同步温度控制,一致性依赖热分布设计;两者在设计上都显著降低了功率,但方式不同:多加热器设计合理利用被动热共享,将相邻加热器的余热可辅助维持其他通道温度,减少单个加热器的功耗;共享分布式则使用单个加

热器为多个传感单元供热,避免重复加热,同时优化热流路径可最小化向衬底的散热,提升加热效率。共享式设计在功耗和集成度上的优势是以响应/恢复时间延长为代价的,这是由热力学本质和系统级限制共同决定的,因此多微加热器设计在响应恢复时间上大幅领先于共享分布式。此外,多加热器设计由于需隔离各加热器电路,可能造成布线复杂、制造困难、成本升高等问题。

3 微加热器的材料选择

微加热器的材料是MEMS气体传感器实现气体检测功能的关键组成部分之一^[73],其热导率、电阻温度系数及热稳定性直接决定传感器的响应速度、功耗和长期可靠性。低热容、高热导材料(如Pt、SiC等)可实现快速升降温,提升动态响应;而高电阻温度系数(temperature coefficient of resistance, TCR)材料(如多晶硅等)利于精确温控,但可能引入热应力。此外,材料氧化、电迁移及与MEMS结构的兼容性也影响加热器寿命。优化材料选择(如掺杂Si或新型纳米材料)可平衡能效与稳定性,是提升气体传感器性能的重要研究方向。

3.1 纯金属

目前微加热器最常用材料是Pt,Pt是一种能够承受大电流密度且抗氧化性能极强的金属,可在高温环境下保持结构稳定^[74]。凭借稳定的电阻温度系数,Pt在温度传感领域表现出色。然而Pt材料也存在一些局限性,如温度耐受上限相对较低,且在CMOS制造技术中并非标准材料,在一定程度上限制了其在某些特定制造工艺中的应用。

Au因高导电性和热稳定性而被广泛研究^[75],尽管其成本较高但能提供优异的性能。Cu^[76]、Ni^[38]、Mo^[77]、Al^[54]也常作为微加热器材料,Cu具有优异的导热性和低电阻率,常用于需要快速热响应的应用,但需解决高温氧化问题;Ni因其高TCR和较低成本,适合中低温加热器,在气体传感器中表现良好;Al则凭借极低成本、低电阻率和快速响应特性,成为经济型加热器的优选材料,但受限于其较低熔点。这些材料特性使得设计上需要根据实际情况进行选择。

3.2 合金金属

随着对传感器性能要求的不断提升,单一金属材料已逐渐难以满足所有应用需求。因此,众多学者开始探索使用合金等新型材料,通过材料的复合优势进一步提升微加热器乃至整个传感器的性能^[78]。Bagga等^[79]仿真并制作的镍铬微加热器在250~300Ω电阻下可线性升温,TCR仅0.00029℃⁻¹;将硅膜减至9μm后,90mA即可达340℃以上,温度分布均匀,制备的SnO₂传感器对液化石油气灵敏度达1.5kΩ/sccm。铂铑(Pt-Rh)合金由于其优异的耐高温性、抗氧化性和热电性能,被广泛应用于高温测温、工业加热及特殊环境下的设备保护,Kalinin等^[80]通过仿真和实验对基于Pt和Pt-Rh薄膜的微加热器稳定性进行了比较研究,使用Pt-11%Rh合金制成的微加热器在730℃退火12h后表现出最佳特性,500℃时的功耗为115±14mW,电阻漂移<0.5%/天,活性区的温度梯度<10%。

3.3 金属复合材料

金属复合材料通过将高导热、高强度的金属结合,兼顾快速热响和高温稳定性其热膨胀系数可调的特性还能有效降低热应力,提高器件可靠性。复合材料的可设计性使其能够针对特定传感需求定制性能,成为高性能MEMS器件的理想选择^[81]。

Xie等^[72]将200/5nm厚的Pt/Cr组成的双层结构作为微加热器材料。Cr作为粘附层,能显著提高Pt与下层SiO₂/SiN_x支撑层的结合强度,防止高温下Pt膜脱落或起皱,在5.0V以下工作时无明显性能退化。Chen等^[82]利用等离子体化学气相沉积制备了Ta(15nm)/Pt(300nm)微加热器。基于该微加热器传感器已成功应用于甲烷传感器,在420℃条件下连续运行92天仍保持优异的灵敏度。

双层复合材料虽能实现一定的热隔离与机械强度平衡,但3层复合结构通过引入中间功能层,进一步优化了热导梯度与应力分布。Lovecchio等^[83]提出了一种集成在单一玻璃基底上ITO/Au/ITO叠层材料设计的微加热器。通过施加约60V的电压使加热器达到约90℃的平均温度,功率消耗约为1.3W,实际温度均匀性为±1.4℃,由于薄膜厚度的不均匀性,略高于模拟结果±0.6℃。

双层金属基复合材料结构已展现出良好的低功耗和高响应特性,适用于多种气体检测,但其热管理和机械稳定性仍存在优化空间。相比之下,3层复合结构(如ITO/Au/ITO、Pt/Ti/W等)通过引入中间功能层,进一步优化了热导梯度与应力分布,在温度均匀性、长期稳定性和响应速度上表现更优。尽管3层结构的制备工艺更复杂,但其集成化设计和性能可调性使其在高精度、低功耗传感应用中更具潜力。金属基双层材料适用于常规传感需求,而3层结构更适用于高性能、高稳定性的先进气体传感器设计。

3.4 陶瓷材料

除了上述的纯金属和合金,随着现代技术的发展,陶瓷材料等也逐渐成为研究热点。这些材料不仅具有不同的物理和化学特性,还为传感器的设计和应用提供了更多的选择^[84]。例如,贵金属因其优异的化学稳定性和热导率而被广泛使用,但成本较高;合金在成本和加工性能上具有优势,但在高温下的稳定性可能有限;而陶瓷材料以其高熔点、良好的机械强度和化学稳定性脱颖而出,尤其适用于高温和恶劣环境下的应用。因此,独特优势的陶瓷材料为传感器的优化设计和性能提升提供了更广阔的空间。

Singh等^[85]比较了传统金属材料Ti、Pt和TiN这3种材料在MEMS微加热器中的性能。TiN微加热器在

杨氏模量和硬度方面表现最佳,比 Pt 和 Ti 更坚固耐用,最低的 TCR 值表明其热稳定性最好。TiN 微加热器在 1~10 V 整个测试范围内展现出线性的 $V-I$ 特性,而 Pt 和 Ti 加热器在较低电压(5~6 V)时就达到饱和。在特定电压下,钛氮化物微加热器能达到的温度最高,300±10℃的条件下连续测试 110 h 后,钛氮化物微加热器没有出现明显的电气或机械故障。Tsuruta 等^[86]以含 30 vol% CuO 的 $\text{CaCu}_3\text{Ru}_4\text{O}_{12}$ 作为材料研制了微加热器,加热器温度随施加电压呈线性增长,在长期高温运行及 10 s 内承受 500℃ 剧烈温度变化后仍保持结构完整。该加热器已成功应用于 SnO_2 传感器,实现了氢气检测。

因此,Pt、Au 等材料在超高温下的表现更加优异,普通陶瓷材料如二氧化硅、碳化硅、钛氮化物等在成本上较贵金属或合金成本控制上占有明显优势,因此,陶瓷材料适合在对成本控制有需求且工作温度适中、环境要求高的条件使用。

3.5 其他材料

在 MEMS 气体传感器的微加热器设计中,除了常规的金属和半导体材料外,新兴的纳米颗粒材料、石墨烯和多晶硅等因其独特的物理和化学特性,在微纳加热领域展现出显著优势。纳米颗粒材料凭借其高光热转换、精准局域加热、可调谐性等性质在微纳加热领域展现出显著优势。Khan 等^[75]采用 Au 纳米颗粒溶液在 50 μm 厚的聚酰亚胺衬底上刻制了两种双曲形加热器,实现了 5 μm 厚的薄膜。在 250℃ 的操作温度下,两种加热器设计的功耗仅为 22 和 39 mW,显著降低了功耗。在较大的微加热器上,从中心最高温度到边缘的温度梯度约为 40℃,而在较小的微加热器上约为 13℃。

石墨烯其超高导热率和超薄结构可实现快速热响应与精准局域控温,其机械柔性和化学稳定性使其可集成于柔性电子和生物医学器件,具有高价值应用潜力。Wang 等^[47]开发了一种柔性石墨烯微加热器,无论采用何种电极形态,在 10~30 V 的输入电压下,微加热器达到稳态的时间均 < 3 s。在 120 s 的测试周期内,微加热器能够稳定地进行加热和冷却操作,温度变化稳定,重复性良好且经过 500 次弯曲应力测试后,微加热器的温度输出依然非常稳定,显示出良好的机械稳定性和可靠性。

纯贵金属兼具高化学稳定性与可预测电阻-温度特性,却以高成本与 CMOS 工艺不兼容为掣肘;过渡金属及其合金通过成分调控可显著增强耐高温、抗蠕变及电阻可设计性,却伴随薄膜应力与界面扩散隐患;陶瓷材料凭借高熔点与优异化学惰性胜任极端环境,但脆性大、低 TCR 限制了温控精度;多层复合结构以梯度热导与应力缓冲实现低功耗与温度均匀性的协同优化,却增加工艺复杂度与可靠性风险;新兴纳米碳/金属纳米颗粒及多晶硅则提供柔性、快速响应与 CMOS 兼容性潜力,其长期热稳定性、均匀制备与界面控制仍待突破。

4 结 论

微加热器作为 MEMS 气体传感器的核心功能单元,其结构与性能优化直接影响传感器的检测效能。本文综述了 MEMS 基 MOS 气体传感器微加热器在几何形态、支撑结构、热隔离策略及材料体系 4 个层面的最新进展,分析了当前面临的技术瓶颈与发展趋势。研究表明,几何设计由传统规则形态迈向分形与拓扑优化,显著改善了温度均匀性;结构创新由单一悬浮膜演变为多级热隔离与阵列化集成,同步降低了功耗并提升了机械强度;材料选择则从单一贵金属扩展到合金、陶瓷、多层材料堆叠和石墨烯等,兼顾高温稳定性、CMOS 兼容与柔性应用需求。通过这些设计和材料上的创新,传感器在灵敏度、选择性、响应时间、恢复时间以及长期稳定性等方面均得到了显著改善。未来,随着微加热器技术的不断进步,MEMS 基 MOS 气体传感器有望在更多领域实现更广泛的应用,为环境监测、工业安全、医疗健康等领域提供更加高效、可靠的检测解决方案。

然而,现今 MEMS 传感器在热场均匀性控制、长期稳定性提升等关键技术指标方面亟待突破。基于以上论述,未来,MEMS 基金属氧化物气体传感器的研究领域将可能围绕 3 个方面展开:

1) 微加热器设计与优化:通过设计微加热器的几何形态,如分形形态以及分形迭代次数等新型形态的研究,通过几何参数实现热场均匀性调控;通过多层堆叠、悬空网格及微腔体设计,增加有效加热面积,在更低功耗下实现更均匀、高效的温度场分布,结合脉冲加热模式,进一步降低功耗。

2) 加热器材料探索:未来 MEMS 气体传感器微加热器材料将向高性能复合材料与新型低维材料发展。一方面,金属与陶瓷复合浆料或合金薄膜将继续优化,以平衡功耗、机械稳定性和热响应速度。另一方面,以石墨烯、碳纳米管为代表的低维材料因其超高比表面积、优异导热性和低功耗特性,将成为研究前沿,有助于实现超低功率、快速启停和均匀温度场。此外,与 CMOS 工艺兼容的硅基异质集成材料及耐高温抗氧化涂层也是重要方向,旨在提升器件的集成度、长期稳定性和可靠性。

3) 微热阵列设计:传感器阵列是气体传感技术迈向智能化与普适化的核心驱动力。通过 MEMS 工艺在单芯片上集成多单元微加热器,实现高性能、低功耗,研究微热单元的热串扰和多温区控制是主要方向。这一技术路径将推动微型化、智能气体传感器在移动设备、可穿戴设备等消费电子领域的规模化应用,实现从专业仪器到大众领域的跨越。

参考文献

- [1] 许永辉, 陈寅生, 张铭. MOS传感器阵列的二元混合气体检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(5): 179-187.
XU Y H, CHEN Y SH, ZHANG M. Binary mixed gas detection method using MOS sensor array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(5): 179-187.
- [2] FU Q, LU K ZH, LI N, et al. Advances in the development of MOS-based sensors for detection of ethanol: A review[J]. Materials Research Bulletin, 2023, 168: 112457.
- [3] KANG Q Q, LIN Y ZH, TAO J F. Performance of a MEMS flow sensor with high temperature[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(22): 36426-36432.
- [4] DING H G, HOU ZH Y. Polarization band effect and mems-based plasma generation[J]. Instrumentation, 2024, 11(2): 16-23.
- [5] 孙宏军, 徐浩文, 丁红兵, 等. 基于MEMS的量热式传感器气体流量测量的模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1): 111-119.
SUN H J, XU H W, DING H B, et al. Modelling of gas flow measurement based on MEMS calorimetric sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 111-119.
- [6] LUO Q, LIU R Y, LI Y L, et al. A portable breath acetone analyzer using a low-power and high-selectivity MEMS gas sensor based on Pd/In₂O₃-decorated SnO₂ nanocomposites[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2025, 439: 137854.
- [7] 张巍, 张洲威, 彭春荣, 等. 一种MEMS三维电场传感器抗电荷干扰方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 239-248.
ZHANG W, ZHANG ZH W, PENG CH R, et al. Research on the anti-charge-interference method for MEMS three-dimensional electric field sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 239-248.
- [8] 赵泽宇, 王子伦, 尤睿, 等. MEMS气体传感器: 光学型集成困境与突破性进展[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(7): 21-40.
ZHAO Z Y, WANG Z L, YOU R, et al. MEMS gas sensors: Integration bottlenecks and breakthroughs in optical sensing technologies[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(7): 21-40.
- [9] CHAPARIA M, DEEPAK, CHOUBEY R K, et al. Metal oxide semiconductors for gas sensors: A comprehensive review of materials, mechanisms, and performance[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2026, 204: 110280.
- [10] KANG X Y, DENG N P, YAN Z R, et al. Resistive-type VOCs and pollution gases sensor based on SnO₂: A review[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2022, 138: 106246.
- [11] 张焕卿, 白雪婧, 王德波. 热电式MEMS微波功率传感器模型的研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 110-117.
ZHANG H Q, BAI X J, WANG D B. Model of thermoelectric MEMS microwave power sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 110-117.
- [12] LEE S M, DYER D C, GARDNER J W. Design and optimisation of a high-temperature silicon micro-hotplate for nanoporous palladium pellistors[J]. Microelectronics Journal, 2003, 34(2): 115-126.
- [13] XU L, LI T, GAO X L, et al. Development of a reliable micro-hotplate with low power consumption[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(4): 913-919.
- [14] XU X C, XU R J, LIN Y SH. A voltage-controllable VO₂ based metamaterial perfect absorber for CO₂ gas sensing application[J]. Nanoscale, 2022, 14(7): 2722-2728.
- [15] YUAN ZH Y, YANG F, LI Y D, et al. Characterization of a novel microhotplate for application in a silicon-based nanofilm gas sensor[J]. Instrumentation Science & Technology, 2023, 51(1), 45-58.
- [16] HUANG B M, HSIAO Y J, WANG SH CH, et al. Microheaters for thermal analysis and gas sensing applications[J]. Sensors and Materials, 2024, 36(5): 1859-1868.
- [17] ZHAO W J, XU D, CHEN Y SH, et al. A low-temperature micro hotplate gas sensor based on AlN ceramic for effective detection of low concentration NO₂[J]. Sensors, 2019, 19(17): 3719.
- [18] HU X J, JAIN A, GOODSON K E. Investigation of the natural convection boundary condition in microfabricated

- structures[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2008, 47(7): 820-824.
- [19] LAHLALIA A, LE NEEL O, SHANKAR R, et al. Electro-thermal simulation & characterization of a microheater for SMO gas sensors [J]. *Journal of Microelectromechanical System*, 2018, 27(3): 529-537.
- [20] LAHLALIA A, FILIPOVIC L, SELBERHERR S. Modeling and simulation of novel semiconducting metal oxide gas sensors for wearable devices[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(5): 1960-1970.
- [21] KHAN U, FALCONI C. Micro-hot-plates without simply connected hot-spots and with almost-circular temperature distribution[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 185: 274-281.
- [22] XIAN Y Q, ZHANG P, ZHAI S P, et al. Re-estimation of thermal contact resistance considering near-field thermal radiation effect[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 157: 113601.
- [23] KIM K J, KING W P. Thermal conduction between a heated microcantilever and a surrounding air environment[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(8/9): 1631-1641.
- [24] ASHIKHMINA M A, KAMAEV G N, CHERKAEV A S. Investigation of the conductivity of polycrystalline silicon under joule heating [C]. 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials, 2021: 54-57.
- [25] GRAF M, BARRETTINO D, KIRSTEIN K U, et al. CMOS microhotplate sensor system for operating temperatures up to 500°C [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, 117(2): 346-352.
- [26] KOLEY G. Editorial for the special issue on MEMS/NEMS sensors: Fabrication and application [J]. *Micromachines*, 2019, 10(9): 554.
- [27] BING Y, ZHANG F Y, HAN J T, et al. A Method of ultra-low power consumption implementation for MEMS gas sensors [J]. *Chemosensors*, 2023, 11(4): 236.
- [28] ASRI M I A, HASAN M N, FUAAD M R A, et al. MEMS gas sensors; A review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(17): 18381-18397.
- [29] IYER N G, SUGANTHI S, ARULMOZHI M, et al. Design and evaluation of micro-heater geometries for MEMS-based ozone gas sensor through a theoretical modeling [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 66(4): 2012-2016.
- [30] BEDOUI S, GOMRI S, SAMET H C, et al. Design and simulation of micro-electro mechanical systems (MEMS) for ozone gas sensors [J]. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 2018, 19: 41-46.
- [31] JOY S, ANTONY J K. Design and simulation of a micro hotplate using comsol multiphysics for MEMS based gas sensor [C]. 2015 Fifth International Conference on Advances in Computing and Communications, 2015: 465-468.
- [32] MENDOZA-ACEVEDO S, REYES-BARRANCA M A. Study for the micromachining optimization of micro hotplates used in MEMS-CMOS gas sensors [C]. 2011 8th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, 2011: 1-6.
- [33] ABDESLAM A A, FOUAD K, KHALIFA A. Design and optimization of platinum heaters for gas sensor applications [J]. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 2020, 15(1): 133-141.
- [34] 田姣姣, 尤敏敏, 林祖德, 等. 一种改进的双螺旋结构 MEMS 加热器的设计和制造 (英文) [J]. *微纳电子技术*, 2019, 56(1): 26-33.
- TIAN J J, YOU M M, LIN Z D, et al. Design and fabrication of a MEMS heater with the improved double-spiral structure [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2019, 56(1): 26-33.
- [35] KHARBANDA D K, SURI N, KHANNA P K. Design, fabrication and characterization of laser patterned LTCC micro hotplate with stable interconnects for gas sensor platform [J]. *Microsystem Technologies*, 2019, 25(6): 2197-2204.
- [36] GAIARDO A, NOVEL D, SCATTOLO E, et al. Optimization of a low-power chemoresistive gas sensor: Predictive thermal modelling and mechanical failure analysis [J]. *Sensors*, 2021, 21(3): 783.
- [37] YANG Y P, WEI G F, HE AI X, et al. Design and optimization of a novel multiheater microhotplate with thermal crosstalk [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(9): 15893-15905.
- [38] LU X R, LIU J H, HAN G W, et al. Design and fabrication of a novel poly-Si microhotplate with heat compensation structure [J]. *Micromachines*, 2022,

- 13(12): 2090.
- [39] HUANG L J, ZHANG M, WANG Z Y, et al. Fabrication of fractal Ag mesh/FTO transparent electrodes/heaters with enhanced electrical conductivity based on Mesh hierarchy and shape optimization [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 168: 109895.
- [40] YANG T C, TIAN F CH, COVINGTON J A, et al. Resistance-capacitance gas sensor based on fractal geometry [J]. *Chemosensors*, 2019, 7(3): 31.
- [41] LI B J, WANG L, LI ZH X, et al. Laser layered scanning strategy for fractal Ag mesh transparent conductive electrodes using selective laser ablation and its application to transparent heaters [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 174: 110674.
- [42] XU R J, LIN Y SH. Tunable infrared metamaterial emitter for gas sensing application [J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(8): 1442.
- [43] CHARAN K K S, NAGIREDDY S R, BHATTACHARJEE S, et al. Design of heating coils based on space-filling fractal curves for highly uniform temperature distribution [J]. *MRS Advances*, 2020, 5(18/19): 1007-1015.
- [44] LIU W, SU Q, XUE Y, et al. Design and performance of NiCr-based micro-heater with lower excitation energy [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1507(2): 022015.
- [45] 王玫, 王旭丹, 姜利英. MEMS微热板结构设计及仿真 [J]. *传感器与微系统*, 2024, 43(10): 100-104.
WANG M, WANG X D, JIANG L Y. Structural design and simulation of MEMS micro-hotplate [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 43(10): 100-104.
- [46] WEI G F, WANG P F, LI M H, et al. Simulation and optimization of a planar-type micro-hotplate with Si_3N_4 - SiO_2 transverse composite dielectric layer and annular heater [J]. *Micromachines*, 2022, 13(4): 601.
- [47] WANG C P, HSIAO M H, LEE G H, et al. The investigation of electrothermal response and reliability of flexible graphene micro-heaters [J]. *Microelectronic Engineering*, 2020, 228: 111334.
- [48] CALDERON-GONZALEZ M, CHEYNS D, AMELOOT R, et al. Integrated sensors to experimentally measure microheater uniformity: Geometry implications in meander-based structures [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2024, 33(6): 736-746.
- [49] BANDEWAD G W, PAWAR S N, SHINDE P B, et al. Design and optimization of microheater for smart gas sensor applications [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 62: 3314-3319.
- [50] ZHANG ZH, LUO L Y, LUO Y Y, et al. High-density integration of multiple independent temperature-controlled micro hotplates for MEMS gas sensors [C]. *2023 IEEE Sensors*, 2023: 1-4.
- [51] SUN H, JIANG G X, GUO SH H, et al. Electrode design and device optimization of MEMS micro-hot plate based on gas-sensitive performance [J]. *Results in Engineering*, 2025, 28: 108199.
- [52] 张继豪, 梁峻阁, 江世鹏, 等. 基于 SnO_2 -MXene 的微波阵列气体传感器 [J]. *传感器与微系统*, 2025, 44(7): 41-45.
ZHANG J H, LIANG J G, JIANG SH P, et al. Microwave array gas sensor based on SnO_2 -MXene [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2025, 44(7): 41-45.
- [53] 苏铮, 邢志鹏, 钟一红, 等. MEMS气体传感器发展现状与对策 [J]. *传感技术学报*, 2025, 38(9): 1533-1539.
SU ZH, XING ZH P, ZHONG Y H, et al. Development status and countermeasures of MEMS gas sensors [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2025, 38(9): 1533-1539.
- [54] PHATTHANAKUN R, DEELDA P, PUMMARA W, et al. Design and fabrication of thin-film aluminum microheater and nickel temperature sensors [C]. *2012 7th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 2012: 112-115.
- [55] 马天军, 李娜, 孙建海, 等. MEMS气体传感器及其制作方法: CN118392945A [P]. 2024-10-22.
MA T J, LI N, SUN J H, et al. MEMS gas sensor and its fabrication method; CN118392945A [P]. 2024-10-22.
- [56] ALGAMILI A S, ABIDIN Z Z, KHIR M H B M, et al. Enhanced electrothermal analysis for acetone gas detection based on PolyMUMPs MEMS sensor [J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 26506-26518.
- [57] MA T J, LI N, LIU Y H, et al. Research on thermal

- field coupling simulation of silicon-based micro-hotplate CO sensor [C]. 2024 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose, 2024; 1-3.
- [58] XIE D CH, CHEN D L, PENG SH F, et al. A low power cantilever-based metal oxide semiconductor gas sensor [J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(7): 1178-1181.
- [59] ZHANG ZH H, ZHAO X W, WANG D Y, et al. A micro-hotplate for mems gas sensor wafer level packaging [C]. 2023 24th International Conference on Electronic Packaging Technology, 2023; 1-4.
- [60] JEONG H I, CHOI G, KIM J. Suspended alumina membrane for GA_2O_3 gas sensor with enhanced lifetime at high-temperature [C]. 2020 IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2020; 729-732.
- [61] THOMAS E L H, STRITT J, MANDAL S, et al. Polycrystalline diamond micro-hotplates [J]. Small, 2023, 19(48): 2303976.
- [62] SUN J W, ZHAN T, SOKOLOVSKIJ R, et al. Enhanced sensitivity Pt/AlGaN/GaN heterostructure NO_2 sensor using a two-step gate recess technique [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(15): 16475-16483.
- [63] CHEN Y L, LI M J, YAN W J, et al. Sensitive and low-power metal oxide gas sensors with a low-cost micro-electromechanical heater [J]. ACS Omega, 2021, 6(2): 1216-1222.
- [64] HSIEH C H, LIU CH CH, FANG Y C, et al. Development of a micro gas sensor with a suspended micro heater for methyl mercaptan gas detection [C]. 2023 IEEE Sensors, 2023; 1-4.
- [65] WEI X Y, CHEN Y, YU W H, et al. Design of an ultra low-power glass-based micro-hotplate with thermal isolation structure [C]. 2024 IEEE Sensors, 2024; 1-4.
- [66] YANG Y P, WEI G F, JIAO SH SH, et al. Design and analysis of dual working area micro-hotplate based on thermal crosstalk [J]. Microsystem Technologies, 2025, 31(1): 147-160.
- [67] 尹嘉琦, 沈文锋, 吕大伍, 等. 金属氧化物半导体 MEMS 气体传感器研究进展 [J]. 材料导报, 2024, 38(1): 34-47.
- YIN J Q, SHEN W F, LYU D W, et al. Research progress on metal oxide semiconductor MEMS gas sensors [J]. Materials Reports, 2024, 38(1): 34-47.
- [68] KONDALKAR V V, PARK J, LEE K, et al. MEMS hydrogen gas sensor for in-situ monitoring of hydrogen gas in transformer oil [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2021, 326:128989.
- [69] ZHANG ZH, LUO L Y, ZHANG Y L, et al. Wafer-level manufacturing of MEMS H_2 sensing chips based on Pd nanoparticles modified SnO_2 film patterns [J]. Advanced Science, 2023, 10(26): 2302614.
- [70] LIU R CH, XING CH, XIE D CH, et al. A self-temperature-modulated quadrilateral gas sensor for gas identification [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(8): 8017-8027.
- [71] XUE F, ADEDOKUN G, XIE D CH, et al. A low power four-channel metal oxide semiconductor gas sensor array with T-shaped structure [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2022, 31(2): 275-282.
- [72] XIE D CH, LIU R CH, ADEDOKUN G, et al. A novel low power hexagonal gas sensor cell for multi-channel gas detection [C]. 2021 IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2021; 430-433.
- [73] SEMANCIK S, CAVICCHI R E, WHEELER M C, et al. Microhotplate platforms for chemical sensor research [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2001, 77(1/2): 579-591.
- [74] DJAMELELDINE K, HOCINE R. Thermal analysis of micro-heaters using the 3D-TLM method and COMSOL Multiphysics software for MEMS based gas sensor [J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2023, 99(3): 241-245.
- [75] KHAN S, NGUYEN T P, LUBEJ M, et al. Low-power printed micro-hotplates through aerosol jetting of gold on thin polyimide membranes [J]. Microelectronic Engineering, 2018, 194: 71-78.
- [76] OGWU A, DARMA T H. Optical and surface energy probe of Hamaker constant in copper oxide thin films for NEMS and MEMS stiction control applications [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 4276.
- [77] SACCO L N, VOLLEBREGT S. Transfer-free integration of graphene on suspended micro-hotplates for NO_2 sensing [C]. 2025 IEEE 38th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2025; 904-907.
- [78] 仲逸飞, 刘景全. EvanoHM 合金的双环线型微加热器特性研究 [J]. 传感器与微系统, 2022, 41(1): 7-9,

14.
ZHONG Y F, LIU J Q. Study on characteristics of double-loop linear micro-heater based on Evahnm alloy[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2022, 41(1): 7-9, 14.
- [79] BAGGA S, AKHTAR J, MISHRA S, et al. Fabrication of coplanar microheater platform for LPG sensing applications [J]. *Microsystem Technologies*, 2020, 26(3): 731-738.
- [80] KALININ I A, ROSLYAKOV I V, TSYMBARENKO D M, et al. Microhotplates based on Pt and Pt-Rh films: The impact of composition, structure, and thermal treatment on functional properties [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 317: 112457.
- [81] GUO Q, HAN Y F, ZHANG D. Interface-dominated mechanical behavior in advanced metal matrix composites[J]. *Nano Materials Science*, 2020, 2(1): 66-71.
- [82] CHEN Y, XU P CH, ZHANG P P, et al. Long-term stability improvement of micro-hotplate methane sensor product[C]. 2020 IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2020: 1300-1303.
- [83] LOVECCHIO N, DI MEO V, CAPUTO D, et al. Transparent oxide/metal/oxide thin film heater with integrated resistive temperature sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(17): 18847-18854.
- [84] KUL O, VASILIEV A, SHAPOSHNIK A, et al. Novel screen-printed ceramic MEMS microhotplate for MOS sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 379: 115907.
- [85] SINGH S, JEJUSARIA A, SINGH J, et al. Comparative study of titanium, platinum, and titanium nitride thin films for micro-electro mechanical systems (MEMS) based micro-heaters[J]. *AIP Advances*, 2022, 12(9): 095202.
- [86] TSURUTA A, ITOH T, MIKAMI M, et al. Trial of an all-ceramic SnO₂ gas sensor equipped with CaCu₃Ru₄O₁₂ heater and electrode[J]. *Materials*, 2018, 11(6): 981.

作者简介



蒋安炎,2016年于东华大学获得学士学位,2022年于重庆大学获得博士学位,现为重庆理工大学电气与电子工程学院讲师,主要研究方向为敏感电子学与传感器、仪器与系统。

E-mail:jianganyan@cqut.edu.cn

Jiang Anyan received her B.Sc. degree from Donghua University in 2016, and her Ph.D. degree from Chongqing University in 2022. She is currently a lecturer at the School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology. Her main research interests include sensitive electronics and sensors, instruments and systems.



皮梓岐(通信作者),2023年毕业于重庆理工大学,获得学士学位,目前在重庆理工大学攻读硕士学位,主要研究方向为MEMS气体传感器。

E-mail:piziqi@stu.cqut.edu.cn

Pi Ziqi (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2023. He is currently pursuing his master's degree at Chongqing University of Technology. His main research interest is MEMS gas sensors.