

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514261

MEMS 气体传感器: 光学型集成困境与突破性进展

赵泽宇¹, 王子伦^{1,2}, 尤 睿², 段学欣¹

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072; 2. 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院 北京 100192)

摘 要: 微机电系统 (MEMS) 气体传感器凭借其微型化、低功耗和可批量生产等核心优势, 已成为满足“碳达峰、碳中和”国家战略, 以及环境监测、工业安全和医疗诊断等领域实现分布式、实时监测的关键组件。在化学型、物理型和光学型三大类 MEMS 气体传感器中, 光学型传感器凭借其非接触、高选择性及抗电磁干扰等固有优势, 在易燃易爆、强腐蚀性气体或痕量分析等特定应用场景中展现出不可替代的价值, 是突破化学型和物理型传感器在选择性、响应时间和寿命方面固有局限的重要发展方向。故系统综述了主流 MEMS 气体传感器的传感原理与技术路线, 重点聚焦光学型气体传感器在 MEMS 集成化进程中面临的核心技术瓶颈, 具体体现在 3 个关键部件的微型化与协同集成, 包括高效稳定的微型化光源、长有效光程的微型化气室以及高灵敏度低噪声的集成化探测器。基于详尽的文献调研, 新材料的开发与应用、先进微纳制造与结构设计以及系统集成与智能算法融合是当前光学 MEMS 传感器集成困境的重要方向, 并对光学 MEMS 气体传感器向多功能集成、智能化网络化发展的趋势进行了展望, 旨在为相关领域的研究提供系统性参考, 助力实现真正意义上的“芯片实验室”型智能传感系统。

关键词: MEMS; 气体传感器; 中红外光谱; 微纳光学

中图分类号: TH741

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460. 4025

MEMS gas sensors: Integration bottlenecks and breakthroughs in optical sensing technologies

Zhao Zeyu¹, Wang Zilun^{1,2}, You Rui², Duan Xuexin¹

(1. School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Micro-electro-mechanical systems (MEMS) gas sensors have emerged as pivotal components for meeting the national strategy of “carbon peak and carbon neutrality,” as well as for achieving distributed, real-time monitoring in fields such as environmental monitoring, industrial safety, and medical diagnostics, due to their core advantages of miniaturization, low power consumption, and mass production. Among the three main categories—chemical, physical, and optical—optical MEMS gas sensors have shown irreplaceable value in specific applications such as detecting flammable, explosive, or highly corrosive gases, as well as trace analysis. Their inherent advantages, such as non-contact, high selectivity, and anti-electromagnetic interference, make them an important development direction for overcoming the limitations of chemical and physical sensors in terms of selectivity, response time, and lifetime. This review systematically summarizes the sensing principles and technical approaches of mainstream MEMS gas sensors, focusing on the core technical bottlenecks faced during the MEMS integration of optical gas sensors. These challenges are specifically reflected in the miniaturization and synergistic integration of three key components: developing efficient and stable miniaturized light sources, miniaturized gas chambers with long effective optical paths, and highly sensitive, low-noise integrated detectors. Based on an extensive literature research, the development and application of new materials, advanced micro-nano manufacturing and structural design, and the fusion of system integration with intelligent algorithms are important directions to break through the current integration challenges of optical MEMS sensors. Furthermore, this study highlights future trends in optical MEMS gas sensors, particularly their progression

toward multifunctional integration and intelligent networking, aiming to provide a systematic reference for related research and to help realize a true “lab-on-a-chip” type intelligent sensing system.

Keywords: MEMS; gas sensor; mid-infrared spectroscopy; micro-nano optics

0 引 言

随着“碳达峰、碳中和”国家战略的深入推进,以及工业 4.0 和智慧医疗的快速发展,气体检测技术在环境污染监测、工业过程控制、易燃易爆气体预警和疾病标志物检测等领域的重要性日益凸显。然而,针对这些日益增长的实时、分布式监测需求,当前主流技术标准仍主要依赖传统的气体检测设备,如气相色谱(gas chromatography, GC)、分光光度法(spectrophotometry)、质谱分析(mass spectrometry, MS)和高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)等^[1]。这类设备普遍存在响应时间长、体积庞大、功耗高、成本昂贵等固有缺陷,难以满足物联网时代对分布式传感网络实时监测与信息处理的迫切需求。相比之下,微机电系统技术的发展为气体传感器的微型化、集成化和智能化提供了革命性的解决方案,为实现低成本、低功耗、可批量生产的微型气体传感器奠定了坚实基础^[2]。

近些年来,现场气体检测的需求在多个领域持续增长,例如工业泄漏检测^[3-4]、食品质量快速分析^[5-7]、疾病健康检测^[8-9]以及电池热失控监测^[10-11]等。与此同时,物联网(internet of things, IoT)和智能感知网络技术的快速发展,对气体传感器提出了微型化、集成化和智能化的更高要求^[12-13]。在此背景下,微机电系统(micro electro mechanical systems, MEMS)气体传感器技术正经历显著跃迁,从单一检测走向多功能集成,从分立元件迈向智能系统^[14]。其技术指标不断提升,检测灵敏度已从百万分率(parts per million, ppm)级向万亿分率(parts per trillion, ppt)级迈进,功耗则从百毫瓦级降至毫瓦级^[15-17],展现出相对于传统气体传感器的显著优势。MEMS 技术对于推动化学型和物理型气体传感器实现微型化与高度集成化起到了不可替代的作用。在众多 MEMS 气体传感技术中^[18],光学型传感器因其非接触、高选择性、抗电磁干扰等固有优势,在特定应用场景(如易燃易爆、强腐蚀性气体或痕量分析)中具有不可替代的地位。然而,在蓬勃发展的背后,MEMS 光学型气体传感器仍面临关键技术瓶颈^[19],主要体现在缺乏高效稳定的微型化光源、长有效光程的微型化气室以及高灵敏度低噪声的集成化探测器等方面。此外,光学型气体传感器系统本身复杂度较高(通常由光源、气室、探测器和滤光片等多个部件组成),这极大地增加了整体系统微型化的难度,并对各部件间的协同设计与集成提出了严苛要求。

上述多种因素严重制约了 MEMS 光学气体传感器性能的进一步提升及其应用范围的拓展^[20]。

后文首先梳理了 MEMS 气体传感器的主要类型及其工作原理,探讨了化学型、物理型和光学型传感器的技术特点,阐述了 MEMS 技术在化学型和物理型气体传感器向微型化、高度集成化演变途中发挥的不可替代的作用。然后深入研究红外气体传感器在 MEMS 集成化过程中面临的主要困境,总结了当前光学型气体传感器 MEMS 集成化与系统研究现状,进而剖析仍存在的关键技术挑战。最后对未来发展方向进行展望。通过全面分析 MEMS 气体传感器的技术现状与发展趋势,旨在为相关领域的研究人员提供系统参考,推动 MEMS 气体传感器技术的进一步发展。

1 MEMS 气体传感器传感原理及其分类

MEMS 气体传感器根据检测原理可分为三大类:化学型(基于气体与敏感材料间的化学反应)、物理型(基于气体分子吸附后引起的物理参数变化)和光学型(基于气体分子与光相互作用引起的光学特性变化)。

1.1 化学型以及物理型气体传感

化学型传感器研究方向主要分为金属氧化物半导体(metal-oxide-semiconductor, MOS)类型^[21-22]、电化学传感器^[23]和化学电阻式气体传感器。金属氧化物半导体传感器以 SnO_2 、 WO_3 、 ZnO 等 n 型或 p 型半导体为主要敏感材料,通过捕捉气体分子与材料表面氧物种的电子交换引起的电导率变化进行传感^[24],MOS 传感器研究始于 1966 年 Seiyama 等^[25]发现 ZnO 薄膜在特定温度下对 CO_2 、甲苯和丙烷等气体产生的电阻变化,之后 Figaro 公司成功将 SnO_2 集成到陶瓷管以及加热电阻丝上推动了实际应用^[26]。随着微机电系统技术的发展^[27],MEMS 微热板^[15,28-29]以及微米级叉指电极技术使传感器的尺寸和功耗明显降低^[30],同时纳米材料的开发显著提升了其传感性能^[31]。电化学传感器作为该原理的另一主流传感器,其研究始于 20 世纪 50 年代用于氧气检测^[32]。随后,通过发展三电极体系,其稳定性得到了显著提升。进入 21 世纪,随着 MEMS 技术和固态电解质的应用^[33],电化学传感器实现了低功耗和便携化^[34]例如,Dilhan 等^[35]率先利用硅微加工技术实现了 MEMS 三电极电解池,用于氧气检测。Gatty 等^[36]更是首次报道了晶圆集成的 MEMS 电化学一氧化氮气体传感器,其尺寸仅为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,并实现了十亿分率(parts per billion, ppb)

级的检测限。化学电阻式气体传感器基于气体在电极表面吸附导致电荷转移引起电阻的变化^[37]。早期研究以导电聚合物^[38]为主,作为解决 MOS 传感器高工作温度的解决方案^[39]。随后纳米多孔材料研究方向的兴起,从碳纳米管(carbon nanotubes, CNT)、石墨烯(graphene oxide, GO)等高比表面积与导电性材料成为此类传感器热点,到金属有机框架(metal organic frameworks, MOFs)^[40]、共价有机框架(covalent organic frameworks, COFs)^[41]通过孔径调控^[40]实现选择性吸附,最近的研究重点还包括 MXenes^[42-43]和高熵化合物^[44]。MEMS 技术的发展推动该类传感器由小型化走向微型化,并助力其实现走向多功能集成与智能系统的技术跃迁。

物理型传感器通过检测气体分子吸附引起的质量、应力或介电常数等物理参数变化来实现气体检测^[45]。通常来说更高的谐振频率获得更高灵敏度,该类传感器大都依靠 MEMS 声学换能器进行信号转化。该传感器的最大优势在于可逆性、快速响应与稳定性,其中的典型代表有石英晶体微天平(quartz crystal microbalance, QCM)、声表面波、体声波谐振器等^[1]。QCM 技术早期用于薄膜厚度测量,后扩展至气体检测领域。气体分子吸附在传感层表面导致晶体质量增加,导致共振频率下降。QCM 通过复合纳米材料以及功能化涂层提升传感性

能^[46],在挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)传感上具有重要地位^[47]。常见敏感材料包括 MOFs^[48-49]、金属氧化物^[50]以及导电复合材料^[51-52]等。声表面波(surface acoustic wave, SAW)气体传感器利用压电基底表面传播的声波(Rayleigh 波或 Lamb 波)受气体吸附影响导致的速度或路径长度进而引起谐振频率变化来传感。1885 年 Rayleigh^[53]发现声表面波,1960 年后因微加工技术进步实现微型叉指换能器^[54]。SAW 传感器通过石英压电材料的逆压电效应实现 ppb 级的气体检测。通过功能化涂层修饰,可实现对特定气体的选择性吸附^[55]。体声波(bulk acoustic wave, BAW)技术在 2000 年后随 MEMS 技术发展兴起,最初用于射频滤波波^[56],后通过功能化膜实现气体传感。薄膜体声波谐振器(film bulk acoustic resonator, FBAR)作为 BAW 传感器的典型代表吸附气体导致谐振频率显著偏移(与质量变化成二次方关系)具有比声表面波更高的品质因数^[57-58]。MEMS 技术的成熟不仅仅为该类器件带来由 QCM 衍生至 SAW 进而到 BAW 所带来的直观上的尺寸的缩小以及集成化程度提高等优势,更使得器件基频由 kHz 突破至 GHz 进而带来了更好的气敏性能。图 1 中详细介绍了化学型以及物理型气体传感器中 MEMS 技术演化过程^[59]。

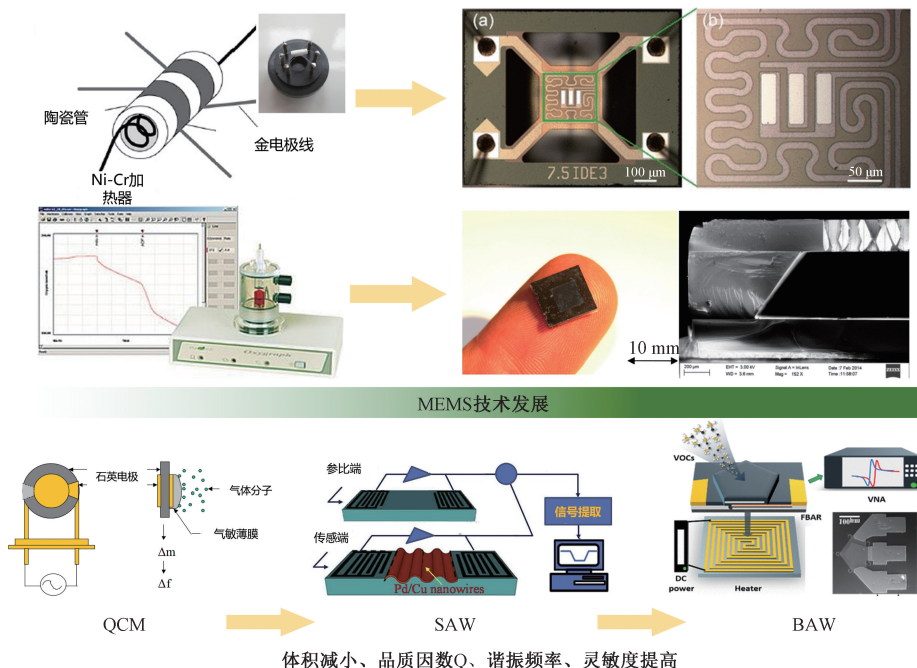


图 1 化学型以及物理型气体传感器中 MEMS 技术演化过程

Fig. 1 The evolution of MEMS technology in chemical and physical gas sensors

MEMS 技术在推动化学型和物理型气体传感器发展的过程中展现出了不可替代的优势,促使这两类传感器成功实现了微型化、分布式部署以及智能化转型,在工业

生产和生命健康等领域产生了重大的经济与科研价值。然而,依赖于气体分子与敏感膜相互作用的化学型和物理型传感技术,普遍存在气体选择性低、检测速度慢以及

使用寿命有限等固有局限性。相较之下,光学型气体传感器凭借其非接触测量、高选择性及抗电磁干扰等固有优势,为解决上述问题提供了有效途径。随着 MEMS 技术的引入,光学气体传感器也成功实现了小型化,并得到了迅速发展,成为化学型和物理型传感器在特定应用场景下的重要补充与有力替代方案。

1.2 光学型气体传感原理

光学型气体传感器的原理基于气体分子对特定波长光的共振吸收现象,这种吸收由分子的振动和转动能级跃迁决定。当光通过气体时,光子的能量与分子内部振动或转动的能级差匹配时,分子会吸收光子并从低能态跃迁至高能态。这种能量匹配关系如式(1)所示。

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

(1)

其中, E 是光子的能量, h 是普朗克常数, ν 是光的频率, λ 是光的波长^[60-61], 气体分子(如 CO_2 、 CH_4) 的红外

吸收峰位置由其分子键振动模式决定(例如 CO_2 在 $4.26\text{ }\mu\text{m}$ 处存在强吸收带)。入射红外光的光子能量与分子振动能级匹配时,光子被吸收,导致透射光强度衰减,进而导致吸收特定波长光的能力具有选择性。这种吸收现象遵循朗伯-比尔定律^[62],透射光强度 I 与气体的浓度 c 、气体吸收系数 α 、光程长度 L 的关系为:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-\alpha(\lambda)cL}$$

(2)

其中, I 是在波长 λ 处检测到的光强度, I_0 是入射光强度, e 是自然常数。通过测量光强度在通过气体前后的变化,可精确计算气体浓度^[63]。光学型传感器原理及光路设计示意图如图 2 所示。许多重要的有机和无机分子在中红外(mid-infrared, MIR)光谱区域(波长约为 $2\sim 20\text{ }\mu\text{m}$)具有特征吸收线,如图 2(c)所示,对应于基本的振动和旋转能转换。根据使用的传感器种类不同可以将光学气体传感主要分为基于光电探测的气体传感器与基于光声探测的红外气体传感器。如图 2(a)所示典型的

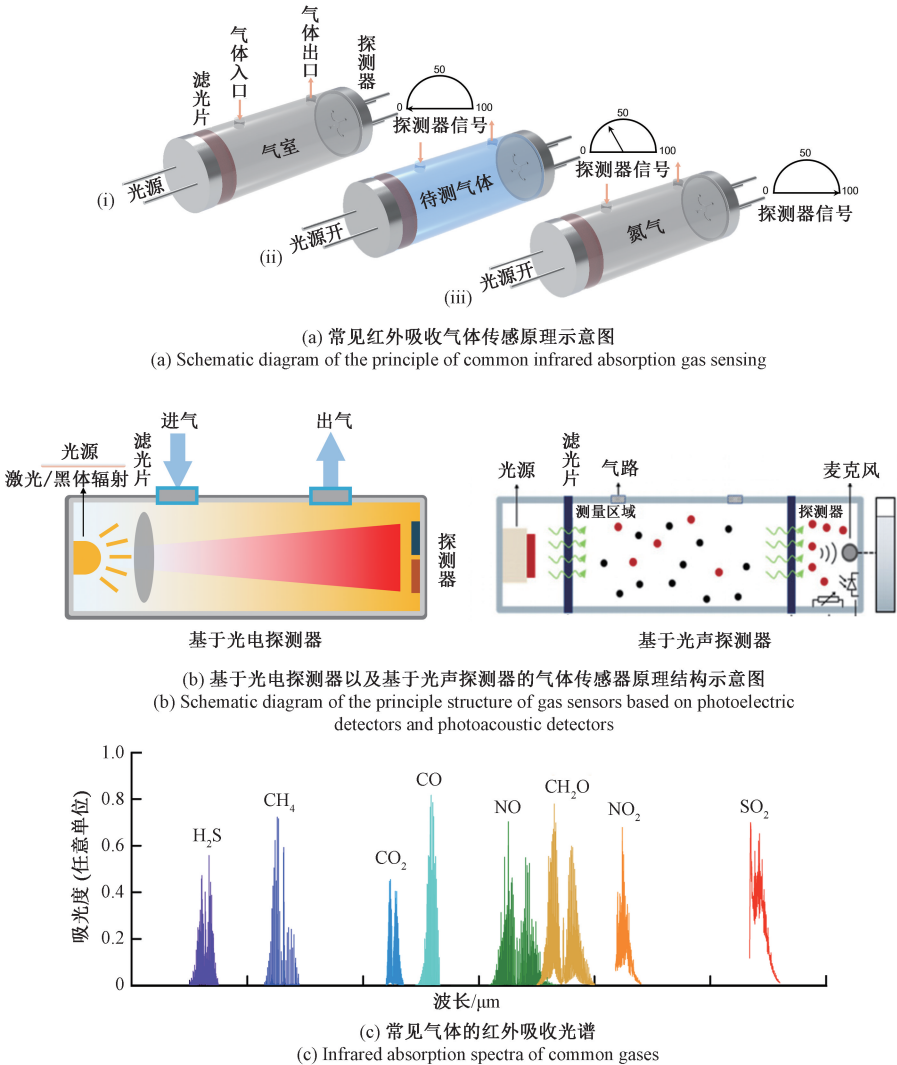


图 2 光学型传感器原理及光路设计示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical sensor principle and optical path design

气体传感器包括光源发射器、光路(气室)、滤光片(用于选择目标波长范围内的光波)以及探测器(用于检测被吸收光强 I)。当气室中充满待测气体后,传感器端接收到的光会由于气体分子的吸收而减弱。在此主要探讨目前主流的基于光电探测以及基于光声探测2种原理的气体传感器。

1) 基于光电探测气体传感器

在典型的传感器结构中,如果光源采用宽光谱的MEMS光源组件^[64],则被称为非色散红外(non-dispersive infrared, NDIR)传感器如图2(b)左图所示,NDIR传感器通过设置窄带滤光片和传感器,基于气体分子在红外波段的特征吸收进行检测。德国科学家 Luft 首次提出 NDIR 技术^[60],并成功用于CO₂检测。该课题组首先在光学滤波器上做出突破,开发出窄带滤波器能够精确分离目标气体吸收波段从而提升选择性。为了进一步提升该传感器的性能,研究始终围绕增强光源辐射强度^[65]以及提升光程长度等方向进行。目前已经应用于多种气体测量,包括二氧化碳^[64]、丙酮^[66]、甲烷^[67]、一氧化碳^[68]等。如果光源采用窄线宽、波长可调谐的激光器,则利用激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)原理,通过精确扫描气体分子特定的、极窄的吸收谱线,从而实现更高的选择性和灵敏度。基于光电探测的气体传感器开发了多种结构模式,包括面对面配置发射器以及探测器、平面配置光源以及发射器的圆顶状或圆锥曲线气室、开放气室、腔体增强单元或者基于倏逝场相互作用的波导。光源通常使用MEMS微热板、发光二极管(light-emitting diode, LED)、分布式反馈激光器(distributed feedback laser, DFB)或量子级联激光器(quantum-cascade laser, QCL),以及光电二极管、热电堆、热释电探测器或光电导探测器等探测器。目前发展最好的以及成功商用的是面对面布置的二氧化碳检测器。

2) 基于光声探测气体传感器

除光电探测器外,使用麦克风检测声学信号的光声光谱技术(photoacoustic spectroscopy, PAS)也是光学型传感器的主流类型,核心原理是光热效应与声学信号的转换^[69]。调制光源(如激光)发射特定波长的光,气体分子吸收光能后通过非辐射弛豫过程转化为热量,热量导致气体局部温度升高并膨胀,产生周期性声压波动(即光声信号)声学传感器将声压梯度转换为电信号,通过电信号强度确定气体浓度,如图2(b)所示。目前光声光谱气体传感器也广泛应用与多种气体,包括二氧化碳、乙炔、乙烷、二氧化硫等。Bell^[70]首次观察到光声效应后,Kreuzer^[71]将激光与光声效应结合,实现了ppb级气体检测,标志着现代PAS技术的诞生。光声光谱技术既保留了光学传感优异的选择性,灵敏度也更高,但其劣势在于响应时间^[72-74]。气室设计上分为谐振式光声气室以及非

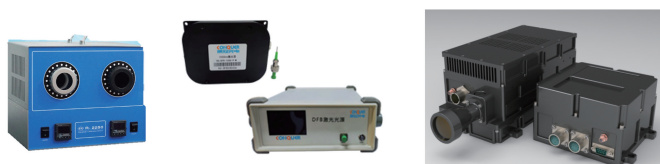
谐振式光声气室,其中谐振式气室通过精确控制激光的调制频率,使其与气室的固有声学共振频率(本征频率)相匹配,从而获得更高灵敏度以及更优信噪比,而非谐振式优势是通常可以将体积做得更小。光源包括LED、MEMS热辐射光源、QCL、带间级联激光器(interband cascade lasers, ICL)或DFB。传感器包括基于充气式或未充气式MEMS麦克风的设计,基于法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Pérot interferometer, FPI)的光学麦克风,或石英叉叉(quartz tuning fork, QTF)。

2 光学型气体传感器 MEMS 集成化困境

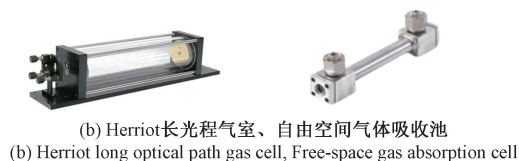
尽管MEMS技术为光学型气体传感器的微型化提供了强大工具,但在实现完全集成化过程中仍面临诸多挑战。光学型MEMS气体传感器主要由光源、气室、探测器以及滤光片4部分组成,对于使用激光做光源的光学型气体传感器(例如光声光谱技术以及激光吸收光谱技术),通常不需要带通滤光片。光学MEMS气体传感器的集成挑战主要集中在光源、气室、探测器和滤光片这4个关键部件的微型化以及相互协同作用进而推动整个传感器的微型化上。

当前,微纳中红外光源的制造成本、有限的调谐性能以及高功耗是限制光学气体传感器发展的重要问题,使得便携化以及分布式网络搭建成为持续性问题。其中光源微型化的瓶颈体现在波长覆盖和功率效率两方面,目前气体传感常见光源如图3(a)所示,主要有黑体辐射、分布式反馈激光器和激光二极管等。传统的黑体光源基于普朗克黑体辐射定律,通过加热腔体材料产生连续宽谱红外辐射,辐射峰值波长随温度升高向短波移动。典型发光黑体物质是高温陶瓷黑体与水冷式黑体,能实现宽谱的连续输出,由于其能耗高响应速度慢通常用于实验室标定或者工业热源,与气体传感的实际应用场景存在较大鸿沟。传统的红外波段激光器通过受激辐射或非线性频率下转换产生强相干光,但需复杂供电与冷却系统支持,典型类型包括量子级联激光器、二极管激光器(laser diode, LD)以及分布式反馈激光器,单色性好、功率密度高,但同样依赖强电驱动与散热设计,体积功耗难以降低。中红外LED光源可以提供更低的功耗以及更高的集成度,但是对5 μm以上的波长覆盖难以实现,成本也急剧上升。

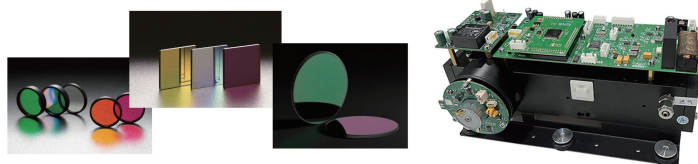
气室微型化的矛盾在于光程长度与体积的权衡。MEMS气室尺寸缩小导致光学路径缩短(<10 mm),直接影响检测灵敏度(Beer-Lambert定律)^[75-76]。传统的光学气室有White池、Herriot池以及平面镜多反射气室等,结构如图3(b)所示。为了提高有效光程长度体积通常过大、机械复杂性高稳定性差等问题,解决方案包括反射



(a) 黑体辐射源、DFB红外激光光源和LD端面泵浦激光器
(a) Blackbody radiation source, DFB infrared laser source, and LD end-pumped laser



(b) Herriot长光程气室、自由空间气体吸收池
(b) Herriot long optical path gas cell, Free-space gas absorption cell



(c) 常见干涉与衍射滤光片、商用NDIR气体传感系统
(c) Common interference and diffraction filters, Commercial NDIR gas sensing system

图 3 光学型气体传感系统传统设备

Fig. 3 Conventional equipment for optical gas sensing system

腔设计(如阶梯锥形反射器)通过多次反射将有效路径延长 62.2 倍^[77],但增加结构复杂度^[78]。微型波导(如硅基中红外波导)通过倏逝场增强气体相互作用,但需精确控制波导尺寸(误差 $\leq \pm 0.1 \mu\text{m}$)以匹配目标气体吸收波长。

光学传感器需要配合窄带滤光片以选择特定气体吸收波段,传统干涉滤光片常见有干涉滤光片、吸收滤光片和衍射滤光片这 3 类,其中干涉型滤光片是目前红外气体传感中应用最广泛的一类滤光片,通常需要传统镀膜技术与微纳加工技术结合,具有厚度体积大(数百微米)且温度敏感性高的特点也通常伴随着插入损耗,如图 3(c)所示。此外,红外探测器(如热电堆、光电导探测器)与读出电路的集成也面临噪声匹配和热隔离等技术难题。光声光谱方面 MEMS 麦克风在微型化后面临灵敏度下降问题,其噪声等效功率(noise-equivalent power, NEP)需优化至 $<1 \text{ nW}/\sqrt{\text{Hz}}$,但微型化导致支撑膜厚度减小($<1 \mu\text{m}$),增加了热噪声^[79-80]。

3 光学型气体传感器小型化及系统小型化现状

MEMS 技术的进步正在推动研究人员对低成本光学气体传感器微型化兴趣。面对上述技术挑战,研究人员已发展出多种创新性的 MEMS 集成方案,推动气体传感器向更小体积、更低功耗和更高性能方向发展。但是低成本低功耗的集成技术仍然是光学型气体传感的重要挑战,本章将通过总结当前主要技术路线及其进展。

3.1 光源微型化

与标准互补金属氧化物半导体工艺(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)工艺兼容的 MEMS 微热板作为宽带热辐射光源取得进展,并且由于其极低的热质量可以实现电学调制(通常为 $>200/\text{Hz}$,最高可达 $>1/\text{kHz}$),标准的 CMOS 材料具有较低的中红外发射率,集成功能性纳米材料涂层是目前主要手段,目前通常使用碳纳米管、氧化石墨烯或超表面/光子晶体结构进行增强。图 4(a)左图中采用低功耗悬空结构, Vincent 等^[64]开发了基于绝缘体上硅(silicon on insulator, SOI)的 MEMS 宽带红外发射器,通过深反应离子刻蚀(deep reactive ion etching, DRIE)制备悬空结构,实现 $200^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ 脉冲高温驱动以及高发射率(0.79 发射率于波长 $4.26 \mu\text{m}$)。适用于 CO_2 检测。研究人员为了实现类黑体辐射的发射谱线,通常采用特征材料如碳基材料(CNTs/石墨烯)实现 >0.9 全波段吸收或发射^[81-82],或黑硅纳米结构(Pt@Si grass)在 $0.8 \sim 2.4 \mu\text{m}$ 波段发射率 >0.9 ^[83]。Popa 等^[84]通过在 CMOS-MEMS 微热板上集成碳纳米管(CNT)涂层,获得了高稳定性、高发射率($\mu \approx 0.96$)的宽带中红外辐射。Li 等^[82]报道的 GO 涂层诱导等离子体激元使发射器的总辐射功率提升至 0.6 mW ,达到未涂层器件的 3 倍,其 TEM 如图 4(a)右图所示。Lai 等^[85]采用 CVD 生长单层厚度纳米级的超取向碳纳米管(single-walled arranged nanotubes, SACNT)薄膜,其具体结构如图 4(b)所示,不仅实现了 $0.2 \sim 334 \mu\text{m}$

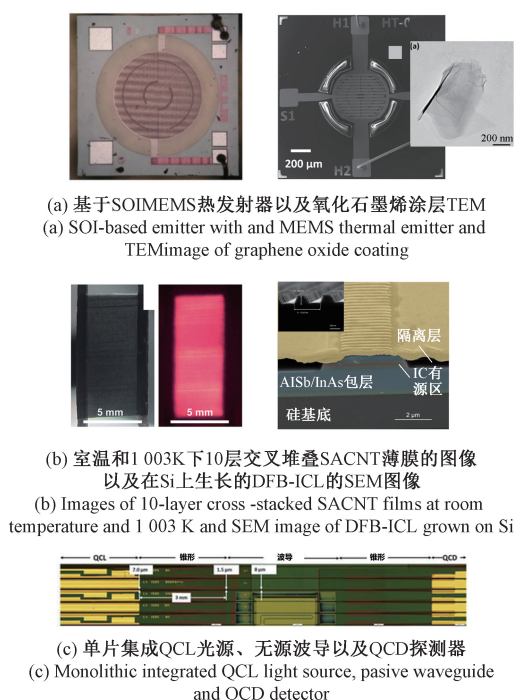


图 4 微型化红外光源

Fig. 4 Miniaturized infrared light sources

的超宽带发射,更将调制频率推高至 150 kHz。

半导体激光光源凭借其窄线宽、高功率和电调谐能力,成为实现 ppb 级痕量气体检测的激光吸收光谱技术的首选。量子级联激光器的集成化是实现高性能片上气体传感系统的关键。Yoo 团队^[86-88]率先在 InGaAs/InP 平台上实现了 QCL 光源、量子级联探测器 (quantum cascade detector, QCD) 以及亚波长波导的单片全集成,并成功演示了对 CO 的片上吸收传感,为构建真正的“芯片实验室”奠定了基础,集成器件结构如图 4(c)^[88]所示。与此同时,混合集成路线也取得了突破,Wang 等^[89]通过高精度的倒装焊技术实现了首个硅基双 DFB-QCL 混合集成,具有 mW 级连续波输出和紧凑的小型封装 ($<1 \text{ mm}^3$)。针对 QCL 较窄的调谐范围限制其宽吸收光谱以及多气体传感能力,Stanton 等^[90]通过 QCL 外延层与 MEMS 兼容 SOI 波导的直接异质键合,并结合阵列波导光栅 (arrayed waveguide grating, AWG) 进行光束合成,实现了宽带、多光谱的化学检测能力,进而实现了约 $4.7 \mu\text{m}$ 波段的多通道光谱光束合成。尽管 MEMS 集成 QCL 光源具有更窄的带宽,更强的发射功率以及电调谐能力,但大规模、经济高效的工艺集成仍未成为现实。

带间级联激光器是一种先进的半导体光源技术,输出功率低于 QCL,但其在波长灵活性、低功耗和集成能力方面展现出独特优势。Hlavatsch 等^[91]演示了使用具有

2 个特征波长的 MIR-ICLED 的微型化 NDIR 传感器实现甲烷以及异丁烷的高选择性检测。Díaz-Thomas 等^[92]完成首次在硅衬底上直接外延生长 DFB 带间级联激光器如图 4(b) 右图所示,并将其应用于甲烷的 PAS 检测中,这为实现 ICL 与 CMOS 电路的终极单片集成铺平了道路。VCSEL 光源因其体积小、功耗低、波长可调谐等优势备受^[93],近红外已实现多波长稳定输出^[94],展现出超高调制特性可以实现快速波长扫描并且在阵列化方向也提供了初步探索^[95]。在表 1 中清晰总结了光学 MEMS 传感器的核心部件光源的微型化技术路线与核心指标。

3.2 气室微型化

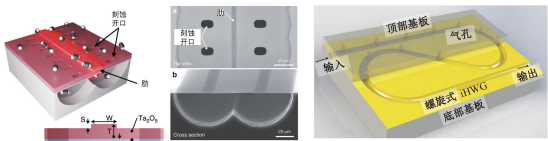
气室微型化技术创新的核心在于通过折叠光路设计,在保持光程长度的同时实现尺寸的平衡优化。近十年的研究主要围绕五大核心架构取得了突破性进展,包括片上固芯/悬空波导 (on-chip solid-core/suspended waveguides)、基底集成空芯光波导 (integrated hollow waveguide, iHWG)、MEMS 多光程/多镜面腔 (MEMS multipass/multi-mirror cavities)、微腔/积分球 (microcavity/integrating cylinder) 以及 MEMS 光声传感室 (MEMS photoacoustic cells)。这些技术通过创新的微纳加工方法,在实现厘米级有效光程的同时,将器件尺寸压缩至平方毫米或立方毫米级别,并推动了从分立元件向全片上系统 (system-on-chip) 的变革。

为了在芯片尺度上实现 ppb 级别的超低检测限,核心挑战在于如何在微小空间内实现足够长的光与气体相互作用路径。片上固芯/悬空波导是通过在芯片上构建光路来增强光与气体相互作用的典范。为在极小的芯片面积 (通常为 $\text{mm}^2 \sim \text{cm}^2$) 内实现数厘米乃至数十厘米的有效光程,研究者们普遍采用螺旋或弯曲的波导布局。传统实芯波导依赖于倏逝场传感,其光-气相互作用强度有限。为了突破这一瓶颈,研究重心转向如何增强外部场约束。槽波导 (slot waveguide) 和悬空波导 (suspended waveguide) 等新结构的出现^[97],极大地提升了外部光场限制因子 (external confinement factor, ECF), Pi 等^[98]报道的两步剥离法制备波导传感器实现了高达 128% 的外部约束,首次超越了自由空间的光气重叠效率。Yallev 等^[99]的工作利用狭缝波导实现了对甲烷 300 ppb (0.3 ppm) 的痕量检测,并设计悬浮肋形结构波导对乙炔 (C_2H_2) 实现 7 ppm 的检测^[100],具体波导结构如图 5(a) 左图所示,标志着芯片级光谱技术首次在检测限上媲美甚至超越了传统的自由空间光学系统,为片上多组分气体同步检测提供了可能。目前,这类器件的 CMOS 工艺兼容性已得到广泛验证,但其灵敏度瓶颈正从光学重叠转向气体交换效率和环境鲁棒性等系统级问题。

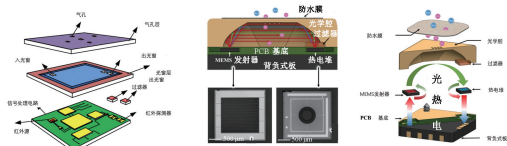
表 1 光学 MEMS 传感器 — 微型化光源技术路线与核心指标

Table 1 Optical MEMS sensors — miniaturized light source technology roadmap and core specifications

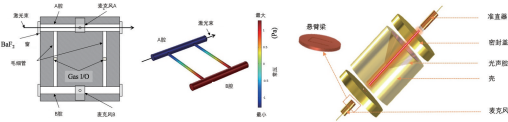
技术路线	主要特点	核心指标			优势	主要挑战
		指标 1	指标 2	指标 3		
MEMS 微热板 (热辐射源)	基于 CMOS 工艺,通过电热效应产生宽带红外辐射,通常悬空设计以减少热损失。可通过功能涂层增强特定波段的发射率	调制频率: 通常 >200 Hz	发射率: >0.9 接近黑体辐射	功耗: 毫瓦级	成本低,与 CMOS 工艺完全兼容,易于批量生产和集成。光谱范围宽,可覆盖多种气体吸收带	辐射功率和能量效率相对较低,宽带发射通常需要额外搭配滤光片以保证选择性
超表面/光子晶体增强光源	将超材料/光子晶体结构与 MEMS 微热板单片集成,实现对发射光谱的精确调控,从而替代传统滤光片	光谱特性: 可实现窄带、单/多波长选择性发射	发射率: 在特定谐振波长可接近 1	品质因数 (Q): Q 值可达 15.7 ^[96]	无需外部滤光片,可显著提升信噪比和系统集成度	设计和制造工艺复杂,对加工精度要求高,增加了成本
量子级联激光器	基于半导体子带间跃迁,产生高功率、窄线宽的中红外激光,可通过电流或温度进行波长调谐	输出功率: mW 级至瓦级	可调谐范围: 几十 cm ⁻¹	集成封装: 混合集成模块体积极可 <1 mm ³	功率高,单色性好,选择性极高,是实现 ppb 级痕量气体检测 (如 TDLAS) 的理想光源	成本高,功耗相对较大。与硅基 CMOS 平台的单片/混合集成在工艺和成本上仍具挑战
带间级联激光器/LED (ICL/ICLED)	功耗低于 QCL 的半导体激光器,在中红外波段展现出独特优势。已实现在硅衬底上的直接外延生长	输出功率: mW 级 ^[92]	功耗: 阈值功耗显著低于 QCL	集成方式: 已实现在硅衬底上的外延生长	功耗优势显著,可实现室温连续工作。与硅基平台集成的潜力巨大,有望降低成本	输出功率普遍低于 QCL



(a) 独立浅肋波导与乙炔分子相互作用的示意图与螺旋 Si-iHWG 的示意图设计
(a) Schematic diagram of the interaction between an independent shallow rib waveguide and a C₂H₂ molecule and Schematic diagram of the design of a helical Si-iHWG104



(b) 高度集成化红外气体传感器的结构川以及集成化球面反射 CO₂ 传感器横截面和红外吸收原理、能量转换过程示意图
(b) Structure of a highly integrated infrared gas sensor and Cross-section of an integrated spherical reflection CO₂ sensor and schematic diagram of the infrared absorption principle energy conversion process



(c) 差分亥姆霍兹谐振腔(DHR)单元的顶视图以及Y型谐振声学室示意图
(c) Top view of the differential Helmholtz resonator (DHR) and Schematic diagram of a Y-type resonant photoacoustic chamber

图 5 微型化光学气室

Fig. 5 Miniaturized optical gas chamber

基底集成空芯光波导 (iHWG) 为实现片上直接吸收光谱提供了一条独特路径。该技术由 Mizaikoff 课题组开创并持续推动^[101-102], 将传统的大体积空芯光纤 (hollow-core fiber) 概念转化为平面化的、可大规模制造的 MEMS 器件。其核心优势在于光束直接在空芯通道中与气体作用, 避免了倏逝场传感的限制。通过标准的硅晶圆深刻蚀和键合工艺, 并常在内壁镀金以增强反射率, iHWG 得以实现低成本、可重复的批量生产^[103]。典型器件在 <3 cm² 的芯片面积上可实现 34 cm 的有效光程器件如图 5(a), 对二氧化碳 (CO₂) 的检测限可达 50 ppm^[104]。Hlavatsch 等^[105] 创新地将 iHWG 气室与中红外带间级联发光二极管 (mid-infrared cascaded light-emitting diode, MIR-ICLED) 集成, 构建了可快速插拔的模块化 NDIR 传感系统。这种设计不仅结构紧凑, 还实现了对多种分析物的灵活检测使其在需要灵活更换传感单元的工业和物联网应用中极具吸引力。

MEMS 多光程腔与微腔/积分球是将传统自由空间光学中的经典设计 (如 Herriott 腔、White 腔) 进行极限压缩的尝试^[106]。Jia 等^[107-108] 在该领域做出了开创性贡献, 他们率先采用 DRIE 和晶圆键合技术, 在硅基上成功制造出完全集成的 MEMS 积分圆柱 (integrating cylinder) 和多光程气室。并在直径 <5 mm、体积仅数十立方毫米的微腔腔体内, 实现了厘米级别的有效光程 (如 3 ~ 3.5 cm), 对 CO₂ 的检测限达到百 ppm 级。Jin 等^[109] 通

过 CMOS 工艺将超薄硅酸盐薄膜作为光学窗口集成在硅芯片上,实现了对混合气体的实时分析,展示了微腔技术在现场和医疗诊断领域的潜力。Yang 等^[110]在 6 英寸晶圆上蚀刻 10 mm×10 mm×1 mm 腔体,通过背面通孔实现光路集成,透射率>90%,其传感器结构如图 5(b)左图所示。类似的 Feng 等^[111]使用球面反射实现了类似功能,结构如图 5(b)所示。同时设计过程中应考虑气体扩散路径,构建气流动力学模型进行设计指导^[112]。

MEMS 光声(photoacoustic spectroscopy, PAS)传感通过检测光吸收产生的声波进行传感^[113]。其气室微型化主要体现在采用 CMOS 兼容的晶圆级工艺,实现单片或堆叠式的硅基微型气室^[114]。为抑制噪声,研究人员开发了差分亥姆霍兹(differential helmholtz, DHR)和双腔室等创新结构,此外,3 D 打印等增材制造技术^[115]也为实现复杂几何形状提供了灵活性,Coutard 等^[116]首次演示了体积<1 cm³的硅基气室,随后在集成度上取得关键突破^[117],将 MEMS 麦克风直接集成到了微型化的光声气室中 1 s 的积分时间实现亚 ppm 气体检测。最终将集成技术进一步优化报道了体积为 0.525 mm³的全硅集成微光声探测器系统(microPA),将 MEMS 麦克风、流体通道

和光声腔体集成在两片堆叠的 200 mm 硅晶圆上实现亚 ppm 的 CO₂ 与 CH₄ 检测。由于光声光谱技术易受环境噪声影响,研究人员通过差分与双腔室设计抑制环境噪声、气流噪声以及窗片噪声,Gassner 等^[118]将一个 9 mm×13 mm×7.8 mm 的吸收腔体与一个晶圆级键合的 MEMS 麦克风探测器成功集成到一个差分测量系统,对 CO₂ 的检测限低至约 81 ppm,且理论模型显示其具备达到亚 ppm 级检测的潜力。Rouxel 等^[119]专注于厘米级微型化差分亥姆霍兹谐振腔的制备与优化,如图 5(c)所示,将甲烷检测限提升至 92 ppbv (parts per billion by volume)。Wu 等^[120]报道了由一个截头圆锥体型缓冲室和一个圆柱形谐振室组成的一种新型微型化 3D 打印 Y 型谐振光声室如图 5(c)所示,实现在 100 s 平均时间下,PAS 系统的检测灵敏度和最低检测限分别为 2.29 pm/ppm 和 52.8 ppb。尽管其响应时间(数秒至数分钟)相较于纯光学方法较慢,但其结构坚固、功耗低的特性,使其在分布式空气质量监测和要求严苛的现场传感器应用中成为理想选择^[121]。表 2 总结并比较了 4 种用于光学 MEMS 传感器的微型化气室技术方案,详细列出了它们各自的实现方式、核心性能指标、主要优势以及面临的技术挑战。

表 2 光学 MEMS 传感器 — 微型化气室技术路线与核心指标总结

Table 2 Optical MEMS sensor-Miniaturized gas chamber technology roadmap and core indicators summary

技术架构	实现方式	核心指标			主要优势	主要挑战
		指标 1	指标 2	指标 3		
片上固芯/悬空波导	在 Si、Ge、ChG 等材料上构建螺旋或弯曲的实芯、槽状或悬空波导,利用倏逝场与气体分子作用	有效光程:在 mm ² ~ cm ² 芯片面积上实现 1 ~ 20 cm 的光程	检测限 (limit of detection, LOD): 甲烷、二氧化碳检测可达亚 ppm 级别 ^[99]	外部场约束:采用悬空纳米带结构可实现高达 128% 的 ECF,超越自由空间效率	集成度极高,体积小,与 CMOS 工艺完全兼容。通过“慢光效应”和高 ECF 结构,光与物质相互作用极强	倏逝场传感对表面污染敏感。气体交换效率和在复杂环境(如高湿度)下的长期稳定性
基底集成空芯光波导	在硅基底上通过深刻蚀(DRIE)和键合工艺制造空芯通道,内壁通常镀金以提高反射率,光直接在通道内与气体作用	有效光程:在 <3 cm ² 的芯片面积上可实现 5 ~ 50 cm 的光程	LOD: CO ₂ 检测限约为 ppm 级	芯片尺寸:典型芯片面积 <3 cm ²	避免了倏逝场的限制,光与气体直接作用。可通过晶圆级工艺批量生产,成本较低,且支持模块化设计,便于与不同光源/探测器集成	与片上波导相比,体积相对较大,在追求超长光程时,对准精度和内壁反射率均匀性要求高
MEMS 多光程腔	将传统的 Herriott 腔、White 腔或积分球结构,通过 MEMS 深刻蚀和晶圆键合技术在芯片上进行微缩化	有效光程:在 mm ³ ~ cm ³ 级别的体积内可实现 cm 级光程	LOD: CO ₂ 检测限在 100 ~ 750 ppm 范围	芯片尺寸:直径 <5 mm 的集成腔体已有报道 ^[107-108]	在紧凑体积内实现显著的光程延长,兼容片上光源和探测器。适合需要快速响应的在线分析	机械结构相对复杂,对微反射镜的对准精度和稳定性要求高,需仔细设计气体扩散路径以避免死体积
MEMS 光声传感室	采用 MEMS 工艺在硅基上制造微型谐振腔,如差分亥姆霍兹谐振腔,与 MEMS 麦克风单片或混合集成	体积:典型模块体积为几十到几百 mm ³	LOD: CO ₂ 检测限可达 80 ppm;CH ₄ 检测限可达 92 ppb		灵敏度高,结构坚固,功耗低。差分设计能有效抑制环境噪声。非常适合分布式、低功耗的物联网应用场景	响应时间相对纯光学方法较慢(数秒至 1 min)

造了体积仅 0.6 μL 的 PA 腔体,对 C_2H_2 的检测限达到 15 ppb。Zhu 等^[136]专注于双谐振增强技术,光声气室的声学谐振频率与悬臂梁探测器的机械谐振频率精确匹配,产生双重共振效应能够将微弱的光声信号进行级联

放大。如表 3 所示,总结并对比了 5 种用于光学 MEMS 传感器的集成化微型探测器技术,详细阐述了每种技术的实现方案、核心性能指标、集成化优势及其面临的主要挑战。

表 3 光学 MEMS 传感器—集成化微型探测器技术路线与核心指标总结

Table 3 Optical MEMS sensors — summary of integrated micro-detector technology roadmaps and core indicators

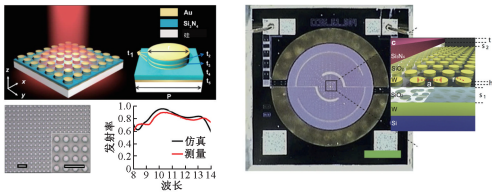
技术类型	实现方案	核心性能指标	集成化优势	主要挑战
热释电探测器	材料: 掺钪氮化铝 (ScAlN)、掺杂氧化铪 (HfO_2) 等结构; 悬空薄膜以实现热隔离。集成: 直接在 CMOS 晶圆上进行后端工艺沉积和微加工。	检测限 (LOD): 数十 ppm (CO_2), 比检测率 (D^*): 10^7 Jones 量级	全 CMOS 兼容: HfO_2 可通过原子层沉积实现, 与 CMOS 工艺完全兼容。 ScAlN 可在低温下沉积, 兼容 CMOS 后端工艺, 可规模化生产制造	高性能单晶材料 (如 LiNbO_3) 与 MEMS 工艺不兼容。 ScAlN 材料的工艺稳定性和优化仍是量产的关键。
测辐射热计	材料: TiOx/Ti 、重掺杂 Ge。结构: 悬空式波导、空气沟槽隔离。集成: 在绝缘体上锗 (GeOI) 或硅 (SOI) 平台上与波导单片集成。	噪声等效功率 (NEP): 可达 $\text{pW}/\sqrt{\text{Hz}}$	高度单片集成: 可与硅基光子波导在同一芯片上制造, 实现极致的片上系统 (SoC)。卓越的热隔离: MEMS 空气沟槽等结构提供了优异的热隔离, 确保了高灵敏度。	系统级集成的复杂性, 如何将高性能的独立器件无缝集成到完整的传感系统中, 同时避免性能下降和噪声干扰。
热电堆	材料: 多晶硅。结构: 悬空薄膜。集成: 直接通过标准 CMOS 工艺制造, 或通过倒装焊 (flip-chip) 技术与波导等光学元件进行混合集成。	比检测率 (D^*): 10^8 Jones 量级	工艺成熟度高: 作为标准 CMOS 工艺的一部分, 技术成熟, 成本极具竞争力。混合集成灵活: 倒装焊等成熟技术便于其与不同材料体系的光学平台灵活集成。	相对于先进的热释电探测器和测辐射热计, 其灵敏度通常较低, 更适用于对成本敏感的应用场景。
电容式光声探测器	材料: 硅。结构: MEMS 悬臂梁或梳齿谐振器。集成: 在 SOI 晶圆上通过 MEMS 工艺单片制造, 可与微型光声腔集成。	噪声等效压力: $\text{uPa}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。品质因数 (Q): $>1\,000$ 。	高密度集成: 解耦式设计 (如 H 型谐振器) 无需声腔体即可工作, 允许极高的集成密度。全硅基方案: 可完全在硅平台上实现单片集成。	气体阻尼效应是限制 Q 值和灵敏度的主要因素; 设计复杂, 对加工精度要求高; 易受电磁噪声干扰。
全光学光声探测器	材料: 硅、石英。结构: 光纤尖端法布里-珀罗 (F-P) 干涉仪; MEMS 悬臂梁-微镜。集成: 传感头 (光纤/悬臂梁) 微型化, 通过光纤与外部解调系统连接。	检测限 (LOD): ppb 级, 微升级光声腔	抗电磁干扰 (EMI): 传感探头无任何电子部件, 完全免疫电磁干扰。极致小型化: 传感头部分可做到极小, 适用于空间受限或分布式传感。	解调系统复杂且成本较高, 限制了整体系统的低成本和大规模集成。

3.4 光学部件集成化

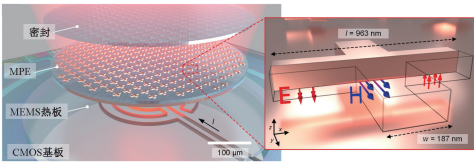
在红外气体传感器微型化的过程中,重点光学部件 (滤光片) 的集成面临重大挑战,超材料 (Metamaterial) 和等离激元 (Plasmonics) 纳米结构通过亚波长尺度的几何设计,能够实现对光场的完美吸收与精准调控,为滤光片的微型化和功能化提供了新思路,尤其在替代传统滤光片以及提升光源、探测器性能方面展现出巨大潜力。传统干涉滤光片通常厚度大且对温度敏感,并且伴随插入损耗,这些特性限制了光学型传感器的进一步微型化和集成,超表面滤光片则通过亚波长结构调控光场,不仅可以作为独立的可调光学滤波器^[137],还可以与微型光源结合形成窄带红外光源,或者与传感器组合形成窄带传感器。

基于超材料和等离子体激元的窄带可调谐红外发射器研究是提升光源光谱性能的重要手段之一^[138],Park 等^[139]引领了较早的红外光源研究,开发了一种基于砷化铟 (InAs) 等离子体超表面的电控动态热发射器件,通过调节载流子密度实现了中红外波段 ($7.3\,\mu\text{m}$) 3.6% 的绝对发射率变化 (相对变化 6.5%),其理论调制带宽可达 172 MHz,为高速、高灵敏度的中红外气体传感提供了无需机械调谐的动态光源。为了实现多气体吸收峰的覆盖,Cao 等^[140]基于堆叠纳米腔超表面 ($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Au}$ 多层结构,如图 7(a) 所示) 的宽带中红外热发射器,在 $8\sim 14\,\mu\text{m}$ 大气窗口内实现了平均发射率 $>80\%$ 、偏振无关且广角 ($<60^\circ$) 稳定的高性能热辐射,其设计通过传播表面等离子体共振与多重间隙等离子体共振的协同耦合拓宽了辐

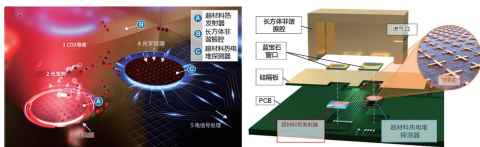
射带宽。Pusch 等^[65]提出周期性钨纳米柱阵列(直径 1 500 nm,高度 500 nm,结构如图 7(a)所示)与 SiO₂ 膜结合的结构,利用表面等离子体共振效应,获得 4.26 μm 波段红外辐射强度 4 倍提升,显著改善 CO₂ 传感器的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)。Lochbaum 等^[96]将超高 Q 值超材料发射器与 MEMS 加热器单片集成,实现温度稳定、角度无关窄带发射,相较于使用传统黑体发射器灵敏度提高了 5 倍,其器件结构如图 7(b)所示。Song 等^[141]采用 TiN/SiO₂/TiN 三层结构,通过表面图案化实现窄带红外发射,用于二甲醚((CH₃)₂O)的检测。通过金属-介电层-金属(metal-insulator-metal, MIM)结构设计可以实现微热板的多个窄带发射调控,Rahimian Omam 等^[142]的 Ag/ZnTe/Al+hBN 复合结构实现 5 个气体吸收峰的覆盖,同时多变的超表面设计也给窄带中红外热发射器的频率相位带来更多变化^[143-144]。为了实现窄带发射,除了超表面设计,Wang 等^[145]设计了一种悬浮的二维蜂窝状光子晶体结构,在同一硅基微热板上成功实现了 3.2、4.0 和 6.0 μm 这 3 个波长的选择性增强发射,为多组分气体传感提供了一种高度集成的解决方案。



(a) 基于砷化钢(InAs)等离子体超表面的电控动态热发射器件以及钨纳米圆柱阵列红外发射器的照片
(a) An electrically controlled dynamic thermal emission device based on an indium arsenide (InAs) plasma metasurface and Photograph of a tungsten nanocylinder array infrared emitter



(b) 分解视图中超材料完美发射器(MPE)光源的图示以及MPE晶胞的示意图
(b) Illustration of a metamaterial perfect emitter (MPE) light source in exploded view and a schematic diagram of an MPE unit cell



(c) 全超材料气体传感器的工作原理以及全超材料传感器原型的爆炸图
(c) Working principle of a fully metamaterial gas sensor and an exploded view of a fully metamaterial sensor prototype

图 7 微型化光学探测器技术

Fig. 7 Miniaturized optical detector technology

同时,超材料和等离子体激元纳米结构设计能够实现

化和功能化提供了新思路。超表面滤光片不但可以与微型光源组成窄带红外光源^[146]、还可以与传感器组合形成具有光谱选择性的传感器^[147]。Lochbaum 等^[148]报道的全超材料设计的中红外气体传感器,将超表面设计实施到光源与传感器上,通过级联超材料完美吸收体(metamaterial perfect absorber, MPA)层在发射器和检测器上,替代传统滤波器,实现紧凑的非共振腔结构(5.7 mm×5.7 mm×4.5 mm),体积较传统传感器减小 30 倍,如图 7(c)所示。Li 等^[149]基于电热执行器的可调超表面实现了红外吸收波段的连续可控,可以满足多气体吸收需求。Hasan 等^[150]通过将超材料吸收器与气体选择性聚合物结合提升检测限,在仅 20 μm×20 μm 的面积上实现了对 CO₂ 气体 40 ppm 的检测限。表面等离子体与高灵敏度 MEMS 谐振器的结合也为基于声学谐振器的高性能非制冷红外传感器提供开阔前景^[151],Venditti 等^[152]将金属-绝缘体-金属等离激元吸收器集成在真空封装的 MEMS 横向振动谐振器(lateral vibrating resonator, LVR)上,用于激光吸收光谱中的 N₂O 检测,其响应度相比无 MIM 增强的器件提升了 2.5 倍。

4 展 望

基于中红外(MIR)吸收光谱的光学气体传感器,凭借其优异的稳定性、选择性和灵敏度,在众多对检测性能要求严苛的应用场景中展现出巨大潜力。并且随着物联网、便携设备和分布式传感网络需求的日益增长,对传感器提出了低成本、低功耗和微型化的更高要求。因此,开发兼具这些特性的微型化光学 MEMS 传感器已成为极具吸引力的发展方向。本综述系统梳理了 MEMS 气体传感器的基本原理,并重点聚焦于光学型传感器在微型化和集成化进程中所面临的核心挑战,即高效稳定微型化光源、长有效光程微型化气室和高灵敏度低噪声集成化探测器的协同实现

当前的研究进展表明,针对光学 MEMS 传感器的集成困境,正从分立元件的优化迈向全系统片上集成的跨越式发展^[153]:

光源层面的发展路径呈现分化。一方面,与 CMOS 工艺兼容的 MEMS 微热板技术日趋成熟。通过集成纳米材料涂层(如碳纳米管、石墨烯)和光谱工程结构(如超表面、光子晶体),有望在实现高调制频率(>1 kHz)和低功耗(<10 mW)的同时,无需外部滤光片即可产生针对特定气体吸收峰的窄带发射,为开发超低成本、可大规模部署的 NDIR 传感器铺平道路。另一方面,以 QCL 和 ICL 为代表的半导体激光器,虽在硅基平台单片/混合集成方面仍面临成本和工艺挑战,但其极高的光谱纯度和功率,在实现 ppb 级痕量气体检测的 TDLAS 和 PAS 应用

中仍是不可或缺的核心组件。

气室层面的核心挑战始终围绕着如何在有限体积内实现足够长的有效光程。片上波导(槽波导、悬空波导)、基底集成空芯波导、微型多光程腔/积分球以及微型光声腔等创新结构不断涌现,通过精妙的微纳设计和加工,在毫米级尺寸上实现了厘米级光程,显著提升了芯片级传感器的灵敏度。

探测器及系统集成层面上技术正朝着全CMOS兼容和多功能融合的方向迈进。新型热释电材料(ScAlN , HfO_2)、高性能测辐射热计(基于GeOI, FCA)以及创新的光声探测器(电容式MEMS谐振器、全光学悬臂梁)不断突破灵敏度与噪声极限。超材料和等离激元技术为滤光片微型化、光源光谱调控和探测器选择性增强提供了革命性方案,推动“无滤光片”或“全超材料”系统集成。通过在发射器或探测器上直接构建光谱选择性结构,可以省去传统的光学元件,实现更高水平的系统集成。未来的终极目标是将MEMS光源、微型气室和高灵敏度探测器集成于同一芯片,并融合机器学习算法进行多组分气体识别与解耦^[154-156],实现真正意义上的“芯片实验室”型智能光学气体传感系统^[157]。

5 结 论

综上,光学MEMS气体传感器正处在一个技术加速融合与性能飞跃的关键时期。未来的突破将更依赖于新材料的持续创新(如新型窄带发射材料、高 Q 值光学材料、高性能热电/压电材料)、先进微纳加工工艺(如异质集成、3D集成、高精度纳米加工)的成熟,以及多物理场(光-热-电-声-流)耦合设计能力的提升。这些技术的深度融合不仅将推动光学MEMS传感器在传统气体检测领域达到新的性能高度(如ppb甚至ppt级痕量检测),更有望拓展其在更广阔的光谱分析、声学探测和生物医学传感领域的应用,为实现普适、智能、网络化的环境感知网络奠定坚实基础。

参考文献

- [1] ASRI M I A, MD HASAN N, FUAAD M R A, et al. MEMS gas sensors: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(17): 18381-18397.
- [2] BHATTACHARYYA P. Technological journey towards reliable microheater development for MEMS gas sensors: A review[J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2014, 14(2): 589-599.
- [3] MOON S E, CHOI N J, LEE H Y, et al. Semiconductor-type MEMS gas sensor for real-time environmental monitoring applications[J]. *ETRI Journal*, 2013, 35(4): 617-624.
- [4] ZHAO Y X. The bottleneck and innovation key of MEMS-based metal oxide semiconductors gas sensor for petrochemical industry[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 489: 151431.
- [5] CHEN L Y, WONG D M, FANG CH Y, et al. Development of an electronic-nose system for fruit maturity and quality monitoring [C]. 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention, 2018: 1129-1130.
- [6] YAN X J, TAN Y, WANG Y, et al. Near-infrared spectral MEMS gas sensor for multi-component food gas detection[J]. *Micromachines*, 2025, 16(2): 135.
- [7] MA M ZH, YANG X T, YING X G, et al. Applications of gas sensing in food quality detection: A review[J]. *Foods*, 2023, 12(21): 3966.
- [8] SINGH S, SATTIGERI R M, KUMAR S, et al. Superior room-temperature ammonia sensing using a hydrothermally synthesized $\text{MoS}_2/\text{SnO}_2$ composite[J]. *ACS Omega*, 2021, 6(17): 11602-11613.
- [9] ALIZADEH N, JAMALABADI H, TAVOLI F. Breath acetone sensors as non-invasive health monitoring systems: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(1): 5-31.
- [10] WANG Z, ZHU L, LIU J W, et al. Gas sensing technology for the detection and early warning of battery thermal runaway: A review[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(12): 6038-6057.
- [11] WANG X X, LI Q T, ZHOU X Y, et al. Monitoring thermal runaway of lithium-ion batteries by means of gas sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2024, 411: 135703.
- [12] 谭彩铭, 谢晓龙. 基于单轴光学陀螺与MEMS IMU的室内移动机器人寻北[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(7): 132-138.
- TAN C M, XIE X L. Indoor mobile robot north-finding based on single-axis optical gyroscope and MEMS IMU[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(7): 132-138.
- [13] 寇志伟, 崔啸鸣, 尹煜, 等. MemS 环形谐振陀螺驱动模态控制方法研究[J]. *电子测量技术*, 2025, 48(12): 42-48.
- KOU ZH W, CUI X M, YIN Y, et al. Study on control methods for driving mode of MEMS vibrating ring gyroscope [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2025, 48(12): 42-48.
- [14] BOGUE R. MEMS sensors: Past, present and future[J]. *Sensor Review*, 2007, 27(1): 7-13.
- [15] 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.
- [16] DAI ZH F, XU L, DUAN G T, et al. Fast-response, sensitive and low-powered chemosensors by fusing nanostructured porous thin film and IDEs-microheater chip[J]. Scientific Reports, 2013, 3(1): 1669.
- [17] KARABACAK D M, BRONGERSMA S H, CREGO-CALAMA M. Enhanced sensitivity volatile detection with low power integrated micromechanical resonators [J]. Lab on a Chip, 2010, 10(15): 1976.
- [18] 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, 44(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, 44(1): 111-119.
- [19] 吴峻苗, 邹德恕, 徐晨, 等. 基于 mems 技术的气动式红外探测器的计算机模拟[J]. 仪器仪表学报, 2004(S1): 416-417, 419.
WU J M, ZOU D SH, XU CH, et al. Simulation of pneumatic infrared sensor based on MEMS technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004(S1): 416-417, 419.
- [20] WU Y J, LEI M, XIA X H. Research progress of MEMS gas sensors: A comprehensive review of sensing materials[J]. Sensors, 2024, 24(24): 8125.
- [21] ZHAO CH H, GONG H M, NIU G Q, et al. MEMS gas sensors-from nanomaterials to microelectrodes[C]. 2020 IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2020: 194-199.
- [22] NIU G Q, WANG F. A review of MEMS-based metal oxide semiconductors gas sensor in mainland China[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2022, 32(5): 054003.
- [23] 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): 34-41.
YIN J Q, SHEN W F, LYU D W, et al. Advances in mems gas sensors based on metal-oxide semiconductor materials [J]. Materials Reports, 2024, 38(1): 34-41.
- [24] 罗凤羽, 郑晓虹, 张骋, 等. N 型半导体金属氧化物 NO₂ 气体传感器研究进展[J]. 功能材料与器件学报, 2020, 26(6): 372-381.
LUO F Y, ZHENG X H, ZHANG CH, et al. Research progress of N-type semiconductor metal oxide NO₂ gas sensors[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2020, 26(6): 372-381.
- [25] SEIYAMA T, KAGAWA S. A new detector for gaseous components using semiconductive thin films [J]. Analytical Chemistry, 1966, 38(8): 1502-1503.
- [26] BARSAN N, KOZIEJ D, WEIMAR U. Metal oxide-based gas sensor research: How to? [J]. Sensors and Actuators, B: Chemical, 2007, 121(1): 18-35.
- [27] CHEN Y, XU P CH, XU T, et al. ZnO-nanowire size effect induced ultra-high sensing response to ppb-level H₂S[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 240: 264-272.
- [28] CHEN Y L, LI M J, YAN W J, et al. Sensitive and low-power metal oxide gas sensors with a low-cost microelectromechanical heater[J]. ACS Omega, 2021, 6(2): 1216-1222.
- [29] 周真, 赵文杰, 施云波, 等. AlN 微热板气体传感器阵列热失稳特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(12): 2757-2762.
ZHOU ZH, ZHAO W J, SHI Y B, et al. Study on thermal instability characteristics of AlN micro-hotplate gas sensor array [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(12): 2757-2762.
- [30] SUEMATSU K, HIROYAMA Y, HARANO W, et al. Double-step modulation of the pulse-driven mode for a high-performance SnO₂ micro gas sensor: Designing the particle surface via a rapid preheating process[J]. ACS Sensors, 2020, 5(11): 3449-3456.
- [31] TIAN X, HU Z X, JIA CH, et al. A review of advanced gas sensor based on sputtering SnO₂ thin film — challenges and opportunities [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(6): 111516.
- [32] CLARK L C, RICHARD W, DONALD G, et al. Continuous recording of blood oxygen tensions by polarography[J]. Journal of Applied Physiology, 1953, 6(3): 189-193.
- [33] SCHWANDT C, KUMAR R V, HILLS M P. Solid state electrochemical gas sensor for the quantitative determination of carbon dioxide [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 265: 27-34.
- [34] HSUEH T J, LU C L. A hybrid YSZ/SnO₂/MEMS SO₂ gas sensor[J]. RSC Advances, 2019, 9(48): 27800-27806.
- [35] DILHAN M, ESTÈVE D, GUÉ A M, et al. Electrochemical oxygen microsensors [J]. Sensors and Actuators, B: Chemical, 1995, 27(1): 401-403.
- [36] GATTY H K, STEMME G, ROXHED N. A wafer-level liquid cavity integrated amperometric gas sensor with ppb-level nitric oxide gas sensitivity[J]. Journal of

- Micromechanics and Microengineering, 2015, 25(10): 105013.
- [37] YUN G, KOO K M, KIM Y. Chemiresistor type formaldehyde sensor using polystyrene/polyaniline core-shell microparticles[J]. Polymer, 2021, 215: 123389.
- [38] ZHANG Y X, KIM J J, CHEN D, et al. Electrospun polyaniline fibers as highly sensitive room temperature chemiresistive sensors for ammonia and nitrogen dioxide gases [J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(25): 4005-4014.
- [39] MIASIK J J, HOOPER A, TOFIELD B C. Conducting polymer gas sensors [J]. Journal of the Chemical Society, 1986, 82(4): 1117-1126.
- [40] JO Y M, JO Y K, LEE J H, et al. MOF-based chemiresistive gas sensors: Toward new functionalities[J]. Advanced Materials, 2023, 35(43): 2206842.
- [41] CHOI J, KIM T, LI H, et al. Gas sensors with two-dimensional rGO@COF composite materials for fast NO₂ detection under room temperature [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(37): 44119-44126.
- [42] SAI BHARGAVA REDDY M, AICH S. Recent progress in surface and heterointerface engineering of 2D MXenes for gas sensing applications[J]. Coordination Chemistry Reviews, 2024, 500: 215542.
- [43] REDDY M S B, KAILASA S, MARUPALLI B C G, et al. A family of 2D-MXenes: Synthesis, properties, and gas sensing applications[J]. ACS Sensors, 2022, 7(8): 2132-2163.
- [44] DAS S, CHOWDHURY S, SEKHAR TIWARY C. High-entropy-based nano-materials for sustainable environmental applications [J]. Nanoscale, 2024, 16(17): 8256-8272.
- [45] HASHWAN S S B S, KHIR M H M, NAWI I M, et al. A review of piezoelectric MEMS sensors and actuators for gas detection application [J]. Discover Nano, 2023, 18(1): 25.
- [46] BAO M H, YANG P Y, HUANG Y P, et al. A novel MEMS gas sensor with effective combination of high sensitivity and high selectivity[C]. 13th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, 2002: 471-474.
- [47] LIU K W, ZHANG CH. Volatile organic compounds gas sensor based on quartz crystal microbalance for fruit freshness detection: A review [J]. Food Chemistry, 2021, 334: 127615.
- [48] WANG X K, XU X Y, ZHOU T T, et al. Nanoscale MOF-74-based QCM gas sensor for CO₂ detection at room temperature[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2024, 413: 135874.
- [49] CHEN SH H, DUAN X Y, LIU C, et al. La-Ce-MOF nanocomposite coated quartz crystal microbalance gas sensor for the detection of amine gases and formaldehyde[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 467: 133672.
- [50] ALEV O, SARICA N, ÖZDEMİR O, et al. Cu-doped ZnO nanorods based QCM sensor for hazardous gases[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 826: 154177.
- [51] FENG L H, FENG L Y, LI Q, et al. Sensitive formaldehyde detection with QCM sensor based on PAAm/MWCNTs and PVAm/MWCNTs [J]. ACS Omega, 2021, 6(22): 14004-14014.
- [52] GUPTA M, HAWARI H F, KUMAR P, et al. Functionalized reduced graphene oxide thin films for ultrahigh CO₂ gas sensing performance at room temperature[J]. Nanomaterials, 2021, 11(3): 623.
- [53] RAYLEIGH L. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid[J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1885, s1-17(1): 4-11.
- [54] WHITE R M, VOLTMER F W. Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves[J]. Applied Physics Letters, 1965, 7(12): 314-316.
- [55] ALGAMILI A S, HARIS M, KHIR M, et al. A review of actuation and sensing mechanisms in MEMS-based sensor devices[J]. Nanoscale Research Letters, 2021, 16(1): 16.
- [56] LAKIN K M, WANG J S. Acoustic bulk wave composite resonators[J]. Applied Physics Letters, 1981, 38(3): 125-127.
- [57] BENETTI M, CANNATA D, D'AMICO A, et al. Thin film bulk acoustic wave resonator (TFBAR) gas sensor[C]. 2004 IEEE Ultrasonics Symposium, 2004, 3: 1581-1584.
- [58] WANG Z L, SUN X Y, CHANG Y, et al. FBAR gas sensors[M]. Piezoelectric Sensors, 2024: 253-290.
- [59] GATTY H K. MEMS-based electrochemical gas sensors and wafer-level methods [D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2015.
- [60] BOGUE R. Detecting gases with light: A review of optical gas sensor technologies [J]. Sensor Review, 2015, 35(2): 133-140.
- [61] HODGKINSON J, TATAM R P. Optical gas sensing: A review [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(1): 012004.
- [62] ZHANG Y, GAO W ZH, SONG ZH Y, et al. Design of a novel gas sensor structure based on mid-infrared

- absorption spectrum [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 147(1): 5-9.
- [63] LIM S H, FENG L, KEMLING J W, et al. An optoelectronic nose for the detection of toxic gases [J]. *Nature Chemistry*, 2009, 1(7): 562-567.
- [64] VINCENT T A, GARDNER J W. A low cost MEMS based NDIR system for the monitoring of carbon dioxide in breath analysis at ppm levels [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 236: 954-964.
- [65] PUSCH A, DE LUCA A, OH S S, et al. A highly efficient CMOS nanoplasmonic crystal enhanced slow-wave thermal emitter improves infrared gas-sensing devices [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 17451.
- [66] XING Y X, URASINSKA-WOJCIK B, GARDNER J W. Plasmonic enhanced CMOS non-dispersive infrared gas sensor for acetone and ammonia detection [C]. 2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2018: 1687-1691.
- [67] DONG M, ZHENG CH T, MIAO SH ZH, et al. Development and measurements of a mid-infrared multi-gas sensor system for CO, CO₂ and CH₄ detection [J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2221.
- [68] TAN Q L, TANG L CH, YANG M L, et al. Three-gas detection system with IR optical sensor based on NDIR technology [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 74: 103-108.
- [69] NARAYAN R J. *Encyclopedia of sensors and biosensors* [M]. 2022.
- [70] BELL A G. On the production and reproduction of sound by light [J]. *American Journal of Science*, 1880, 20: 305-324.
- [71] KREUZER L B. Ultralow gas concentration infrared absorption spectroscopy [J]. *Journal of Applied Physics*, 1971, 42(7): 2934-2943.
- [72] FATHY A, SABRY Y M, HUNTER I W, et al. Direct absorption and photoacoustic spectroscopy for gas sensing and analysis: A critical review [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(8): 2100556.
- [73] ZHANG CH, QIAO SH D, HE Y, et al. Multi-resonator T-type photoacoustic cell based photoacoustic spectroscopy gas sensor for simultaneous measurement C₂H₂, CH₄ and CO₂ [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2025, 427: 137168.
- [74] LI T L, SIMA C, AI Y, et al. Photoacoustic spectroscopy-based ppb-level multi-gas sensor using symmetric multi-resonant cavity photoacoustic cell [J]. *Photoacoustics*, 2023, 32: 100526.
- [75] NG D K T, HO C P, XU L F, et al. NDIR CO₂ gas sensing using CMOS compatible MEMS ScAlN-based pyroelectric detector [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, 346: 130437.
- [76] WANG Y F, NAKAYAMA M, YAGI M, et al. The NDIR CO₂ monitor with smart interface for global networking [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2005, 54(4): 1634-1639.
- [77] AYERDEN N P, DE GRAAF G, ENOKSSON P, et al. A highly miniaturized NDIR methane sensor [C]. *Micro-Optics 2016*, 2016: 98880D.
- [78] HAN J H, HAN S W, KIM S M, et al. High detection performance of NDIR CO₂ sensor using stair-tapered reflector [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(8): 3090-3097.
- [79] MA G M, ZHAO SH J, JIANG J, et al. Tracing acetylene dissolved in transformer oil by tunable diode laser absorption spectrum [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 14961.
- [80] XIONG SH D, YIN X Y, WANG Q, et al. Photoacoustic spectroscopy gas detection technology research progress [J]. *Applied Spectroscopy*, 2024, 78(2): 139-158.
- [81] DE LUCA A, COLE M T, HOPPER R H, et al. Enhanced spectroscopic gas sensors using in-situ grown carbon nanotubes [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(19): 194101.
- [82] LI N X, YUAN H Y, XU L F, et al. Radiation enhancement by graphene oxide on microelectromechanical system emitters for highly selective gas sensing [J]. *ACS Sensors*, 2019, 4(10): 2746-2753.
- [83] MÜLLER L, KÄPPLINGER I, BIERMANN S, et al. Infrared emitting nanostructures for highly efficient microhotplates [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, 24(3): 035014.
- [84] POPA D, HOPPER R, ALI S Z, et al. A highly stable, nanotube-enhanced, CMOS-MEMS thermal emitter for mid-IR gas sensing [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 22915.
- [85] LAI L W, LIU P, ZHOU D L, et al. Rapidly modulated wide-spectrum infrared source made of super aligned carbon nanotube film for greenhouse gas monitoring [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(4): 2208891.
- [86] CHAKRAVARTY S, MIDKIFF J, YOO K, et al. Monolithic integration of quantum cascade laser, quantum cascade detector, and subwavelength waveguides for mid-infrared integrated gas sensing [C]. *Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XVI*, 2019: 109261V.

- [87] YOO K M, MIDKIFF J, ROSTAMIAN A, et al. InGaAs membrane waveguide: A promising platform for monolithic integrated mid-infrared optical gas sensor[J]. *ACS Sensors*, 2020, 5(3): 861-869.
- [88] MIDKIFF J, YOO K M, DALIR H, et al. Monolithic integration of quantum cascade laser, quantum cascade detector, and passive components for absorption sensing at $\lambda = 4.6 \mu\text{m}$ [C]. *Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XVII*, 2020: 2546327.
- [89] WANG D B, KANNOJIA H K, JOUY P, et al. Innovative integration of dual quantum cascade lasers on silicon photonics platform [J]. *Micromachines*, 2024, 15(8): 1055.
- [90] STANTON E J, SPOTT A, PETERS J, et al. Multi-spectral quantum cascade lasers on silicon with integrated multiplexers[J]. *Photonics*, 2019, 6(1): 6010006.
- [91] HLAIVATSCH M, SCHÄFER N, WEIH R, et al. Miniaturizing gas sensors combining mid-infrared interband cascade light emitting diodes with substrate-integrated hollow waveguides[J]. *AIP Advances*, 2024, 14(8): 85319.
- [92] DÍAZ-THOMAS D A, AYACHE D, FAGOT M, et al. Single mode, distributed feedback interband cascade lasers grown on si for gas sensing[J]. *Applied Physics Letters*, 2025, 126(3): 31102.
- [93] ZHANG Q R, LI H H, HAN B G, et al. Development of MEMS thermal emitters applicable in NDIR gas sensors: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(10): 16562-16574.
- [94] ZHANG L, WEI Z X, WANG ZH M, et al. High-speed multi-user optical wireless communication between VCSEL-integrated electronic devices [J]. *Optics Communications*, 2021, 486: 126774.
- [95] AMPHAWAN A, FAZEA Y. Laguerre-gaussian mode division multiplexing in multimode fiber using SLMs in VCSEL arrays [J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2016, 12(1): 12.
- [96] LOCHBAUM A, FEDORYSHYN Y, DORODNYI A, et al. On-chip narrowband thermal emitter for mid-IR optical gas sensing[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(6): 1371-1380.
- [97] LIU W X, MA Y M, CHANG Y H, et al. Suspended silicon waveguide platform with subwavelength grating metamaterial cladding for long-wave infrared sensing applications[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(7): 1861-1870.
- [98] PI M Q, ZHENG CH T, ZHAO H, et al. Ultra-wideband mid-infrared chalcogenide suspended nanorib waveguide gas sensors with exceptionally high external confinement factor beyond free-space [J]. *ACS Nano*, 2023, 17(18): 17761-17770.
- [99] YALLEW H D, VLK M, DATTA A, et al. Sub-ppm methane detection with mid-infrared slot waveguides[J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(12): 4282-4289.
- [100] VLK M, DATTA A, ALBERTI S, et al. Extraordinary evanescent field confinement waveguide sensor for mid-infrared trace gas spectroscopy [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 26.
- [101] SIEGER M, MIZAIKOFF B. Toward on-chip mid-infrared sensors [J]. *Analytical Chemistry*, 2016, 88(11): 5562-5573.
- [102] TÜTÜNCÜ E, NÄGELE M, FUCHS P, et al. iHWG-ICL: Methane sensing with substrate-integrated hollow waveguides directly coupled to interband cascade lasers[J]. *ACS Sensors*, 2016, 1(7): 847-851.
- [103] BARRETO D N, KOKORIC V, DA SILVEIRA PETRUCI J F, et al. From light pipes to substrate-integrated hollow waveguides for gas sensing: A review[J]. *ACS Measurement Science Au*, 2021, 1(3): 97-109.
- [104] ZHENG SH N, CAI H, XU L F, et al. Miniaturized gas sensor based on silicon substrate-integrated hollow waveguides[C]. *Integrated Optics*, 2021: 116890C.
- [105] HLAIVATSCH M, HAB N, SCHÄFER N, et al. Towards miniaturized gas sensors based on substrate-integrated hollow waveguides and interband cascade light emitting diodes[J]. *Sensors & Diagnostics*, 2023, 2(2): 438-444.
- [106] FATHY A, SABRY Y M, GNAMBODOE-CAPOCHICHI M, et al. Silicon multi-pass gas cell for chip-scale gas analysis by absorption spectroscopy[J]. *Micromachines*, 2020, 11(5): 463.
- [107] JIA X N, ROELS J, BAETS R, et al. On-chip non-dispersive infrared CO₂ sensor based on an integrating cylinder[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4260.
- [108] JIA X N, ROELS J, BAETS R, et al. A miniaturised, fully integrated NDIR CO₂ sensor on-chip[J]. *Sensors*, 2021, 21(16): 5347.
- [109] JIN T N, ZHOU J CH, WANG Z L, et al. Real-time gas mixture analysis using mid-infrared membrane microcavities[J]. *Analytical Chemistry*, 2018, 90(7): 4348-4353.
- [110] YANG J, CHENG Y H, YUAN Y P, et al. Design and optimization of an integrated MEMS gas chamber with high transmissivity [J]. *Digital Communications and Networks*, 2021, 7(1): 82-91.

- [111] FENG L Y, LIU Y X, WANG Y, et al. An ultra-small integrated CO₂ infrared gas sensor for wearable end-tidal CO₂ monitoring[J]. *iScience*, 2023, 26(11): 108293.
- [112] 强振峰, 王雪, 张效天. 非色散红外气体传感器稳态扩散高斯分布浓度校正方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(2): 138-145.
- QIANG ZH F, WANG X, ZHANG X T. Gaussian distribution of stable diffusion for gas concentration correction on infrared dispersive gas sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(2): 138-145.
- [113] ZHONG ZH CH, LIU K Y, HAN X, et al. Review of fiber-optic distributed acoustic sensing technology[J]. *Instrumentation*, 2019, 6(4): 47-58.
- [114] GLIÈRE A, ROUXEL J, BRUN M, et al. Challenges in the design and fabrication of a lab-on-a-chip photoacoustic gas sensor[J]. *Sensors*, 2014, 14(1): 957-974.
- [115] WANG F P, FU L Y, WU J H, et al. A compact photoacoustic detector for trace acetylene based on 3-D-printed differential helmholtz resonators [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(22): 27207-27214.
- [116] COUTARD J G, GLIÈRE A, FÉDÉLI J M, et al. Photoacoustic cell on silicon for mid-infrared QCL-based spectroscopic analysis [C]. *MOEMS and Miniaturized Systems XVIII*, 2019: 109310V.
- [117] LHERMET H, VERDOT T, TEULLE A, et al. Micro-photoacoustic cell with integrated microphone for sub-ppm gas sensing[C]. *2019 20th International Conference on Solid-state Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII*, 2019: 68-71.
- [118] GASSNER S, ESSING S, TUMPOLD D, et al. Miniaturized two-chamber photoacoustic CO₂ sensor with a wafer-bonded MEMS (micro-electro-mechanical systems) detector[J]. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2024, 13(2): 219-226.
- [119] ROUXEL J, COUTARD J G, GIDON S, et al. Miniaturized differential helmholtz resonators for photoacoustic trace gas detection [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 236: 1104-1110.
- [120] WU G J, WU X, GONG ZH F, et al. Highly sensitive trace gas detection based on a miniaturized 3D-printed Y-type resonant photoacoustic cell [J]. *Optics Express*, 2023, 31(21): 34213-34223.
- [121] GLIÈRE A, BARRITAULT P, BERTHELOT A, et al. Downsizing and silicon integration of photoacoustic gas cells[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2020, 41(2): 16.
- [122] NG D K T, ZHANG T, SIOW L Y, et al. A functional CMOS compatible MEMS pyroelectric detector using 12%-doped scandium aluminum nitride [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(18): 183506.
- [123] NG D K T, XU L F, FU Y H, et al. CMOS AlN and ScAlN pyroelectric detectors with optical enhancement for detection of CO₂ and CH₄ gases[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2023, 9(8): 2300256.
- [124] LEHMKAU R, MUTSCHALL D, KAISER A, et al. Fully CMOS-compatible pyroelectric infrared detector based on doped HfO₂ thin film in 3D-integration [C]. *Oxide-based Materials and Devices XIII*, 2022: 49.
- [125] KIM I, LIM J, SHIM J, et al. Freestanding germanium photonic crystal waveguide for a highly sensitive and compact mid-infrared on-chip gas sensor [J]. *ACS Sensors*, 2024, 9(10): 5116-5126.
- [126] SHIM J, LIM J, GEUM D M, et al. High-sensitivity waveguide-integrated bolometer based on free-carrier absorption for Si photonic sensors[J]. *Optics Express*, 2022, 30(23): 42663-42667.
- [127] SHIM J, LIM J, KIM I, et al. Room-temperature waveguide-integrated photodetector using bolometric effect for mid-infrared spectroscopy applications [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 125.
- [128] YAZICI M S, DONG B W, HASAN D, et al. Integration of MEMS IR detectors with MIR waveguides for sensing applications[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11524-11537.
- [129] LEDERMANN N, MURALT P, BABOROWSKI J, et al. Piezoelectric Pb(Zr_x, Ti_{1-x})O₃ thin film cantilever and bridge acoustic sensors for miniaturized photoacoustic gas detectors [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, 14(12): 1650-1658.
- [130] CHAMASSI K, TRZPIL W, ARINERO R, et al. Capacitive silicon micro-electromechanical resonator for enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(8): 81106.
- [131] TRZPIL W, MAURIN N, ROUSSEAU R, et al. Analytic optimization of cantilevers for photoacoustic gas sensor with capacitive transduction[J]. *Sensors*, 2021, 21(4): 1489.
- [132] TRZPIL W, CHARENSOL J, AYACHE D, et al. A silicon micromechanical resonator with capacitive transduction for enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 2022, 353: 131070.
- [133] SEOUDI T, CHARENSOL J, TRZPIL W, et al. Highly sensitive capacitive MEMS for photoacoustic gas trace

- detection[J]. *Sensors*, 2023, 23(6): 3280.
- [134] GONG ZH F, WU G J, CHEN K, et al. Fiber-tip gas transducer based on all-optical photoacoustic spectroscopy [J]. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(15): 5300-5306.
- [135] ZHOU SH, SLAMAN M, IANNUZZI D. Demonstration of a highly sensitive photoacoustic spectrometer based on a miniaturized all-optical detecting sensor [J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 17541-17548.
- [136] ZHU Y L, GUAN Y CH, JIANG X, et al. A dual-resonance enhanced photoacoustic spectroscopy gas sensor based on a fiber optic cantilever beam micro-phone and a spherical photoacoustic cell[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2024, 66(5): e34213.
- [137] MENG J J, BALENDHRAN S, SABRI Y, et al. Smart mid-infrared metasurface microspectrometer gas sensing system[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2024, 10(1): 1-9.
- [138] MIHAI L, MIHALCEA R, TOMESCU R, et al. Selective Mid-IR metamaterial-based gas sensor system; Proof of concept and performances tests [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(6): 1009.
- [139] PARK J, KANG J H, LIU X G, et al. Dynamic thermal emission control with InAs-based plasmonic metasurfaces [J]. *Science Advances*, 2018, 4(12): eaat3163.
- [140] CAO T, LIAN M, LIU K, et al. Wideband mid-infrared thermal emitter based on stacked nanocavity metasurfaces [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2021, 4(1): 15402.
- [141] SONG J T, PARK J H, LEE J K, et al. Square-patterned narrow-band infrared emitter for filter less infrared gas sensor [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51(6S): 06FL18.
- [142] RAHIMIAN OMAM Z, GHOBADI A, KHALICHI B, et al. Microheater-integrated spectrally selective multiband mid-infrared nanoemitter for on-chip optical multigas sensing [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, 6(22): 20588-20600.
- [143] SUN M, ZHANG SH, WU D F, et al. Highly-efficient gas sensing using dielectric-based narrow-band thermal emitters operating in the mid-infrared [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2024, 137: 105132.
- [144] CHEN Y K, WANG B X, ZHAO CH Y. Dual-band spatially-distinguishable metasurface thermal emitter for filterless mid-infrared gas sensing [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 185: 108069.
- [145] WANG H H, TOBING L, FU Y H, et al. Suspended honeycomb photonic crystal for high selective thermal emission at infrared wavelengths [C]. *Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-wave Technology and Applications XVIII*, 2025: 1336505.
- [146] KIM I, KIM W S, KIM K, et al. Holographic metasurface gas sensors for instantaneous visual alarms[J]. *Science Advances*, 2021, 7(15): eabe9943.
- [147] TAN X CH, ZHANG H, LI J Y, et al. Non-dispersive infrared multi-gas sensing via nanoantenna integrated narrowband detectors [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5245.
- [148] LOCHBAUM A, DORODNYI A, KOCH U, et al. Compact mid-infrared gas sensing enabled by an all-metamaterial design[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(6): 4169-4176.
- [149] LI K Y, LIANG Y H, LIU Y X, et al. Tunable MEMS-based meta-absorbers for nondispersive infrared gas sensing applications [J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2025, 11(1): 1-13.
- [150] HASAN D, LEE C. Hybrid metamaterial absorber platform for sensing of CO₂ gas at mid-IR[J]. *Advanced Science*, 2018, 5(5): 1700581.
- [151] TAO J, LIANG ZH ZH, ZENG G, et al. Dual functionality metamaterial enables ultra-compact, highly sensitive uncooled infrared sensor [J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(4): 1337-1346.
- [152] VENDITTI A, AYED F B, SIMEONI P, et al. Experimental demonstration of a plasmonically-enhanced vacuum-packaged LVR-based gas sensor[C]. *2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium*, 2024: 1846-1851.
- [153] 张加宏, 朱涵, 顾芳, 等. 非色散红外 CO₂ 气体传感器的抗温湿度干扰设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 36(7): 160-169.
- ZHANG J H, ZHU H, GU F, et al. Anti-interference design of temperature and humidity for non-dispersive infrared CO₂ gas sensor [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 36(7): 160-169.
- [154] 李美花, 闫卫平, 王颖, 等. 微传感器阵列多通道数据采集和处理系统[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(2): 311-317.
- LI M H, YAN W P, WANG Y, et al. Multi-channel data acquisition and processing system based on micro-sensor array[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(2): 311-317.
- [155] 谭光韬, 张文文, 王磊. 气体传感器阵列混合气体检测算法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(7): 95-102.
- TAN G T, ZHANG W W, WANG L. Research on mixed

gas detection algorithm of gas sensor array[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(7): 95-102.

- [156] 徐从裕, 李星辰, 胡雪卡, 等. 基于贝叶斯估计的气体污染源方位辨识[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1389-1393.

XU C Y, LI X CH, HU X K, et al. Identification of direction of air pollution source based on Bayesian estimation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(12): 1389-1393.

- [157] 李张倩, 张锐浩, 马银鸿, 等. 三维微组装多气体传感器测试仪[J]. 电子测量技术, 2024, 44(22): 148-152.

LI ZH Q, ZHANG R H, MA Y H, et al. Three-dimensional micro-assembled multi-gas sensor tester [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 44(22): 148-152.

作者简介



赵泽宇, 2023 年于长安大学获得学士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生, 主要研究方向为气体传感器。

E-mail: zzykiwi@tju.edu.cn

Zhao Zeyu received his B. Sc. degree from Chang'an University in 2023. He is currently pursuing a doctorate at Tianjin University. His main research direction is gas sensing technology.



王子伦 (通信作者), 2016 年于杭州电子科技大学获得学士学位, 2018 年于美国特拉华大学获得硕士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生, 主要研究方向为气体传感器、微纳制造及超表面。

E-mail: zilun_wang_94@tju.edu.cn

Wang Zilun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hangzhou Dianzi University in 2016, and M. Sc. degree from the University of Delaware in 2018. He is currently a

Ph. D. candidate at the College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University. His main research interests include gas sensors, micro/nano fabrication, and metasurfaces.



尤睿, 2013 年于长春理工大学获得学士学位, 2018 年于清华大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院三级教授、副院长, 研究方向为先进功能材料、MEMS 传感器、微系统技术。

E-mail: yourui@bistu.edu.cn

You Rui received his B. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2013, and Ph. D. from Tsinghua University in 2018. He is currently a third-level professor and vice dean of the School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering at Beijing Information Science and Technology University. His research interests include advanced functional materials, MEMS sensors, and microsystem technology.



段学欣, 2001 年于南开大学获得学士学位, 2004 年于南开大学获得硕士学位, 2010 年于荷兰特温特大学获得博士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院教授、国家重点实验室副主任。主要研究方向为微纳尺度的测量与控制、生物微纳机电系统、生物传感器、执行器, 气体传感器, 微流体芯片、声流体镊的应用基础研究以及医工结合的前沿应用研究。

E-mail: xduan@tju.edu.cn

Duan Xuexin received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Nankai University in 2001 and 2004, respectively, and his Ph. D. degree from the University of Twente in the Netherlands in 2010. He is currently a professor at the School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University and deputy director of the State Key Laboratory. His research focuses on basic research in micro and nanoscale measurement and control, bioMEMS, biosensors, actuators, gas sensors, microfluidic chips, and acoustofluidic tweezers, as well as cutting-edge applied research in the integration of medicine and engineering.