MEMS 和 MOEMS 技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022111903

MOEMS 气体传感技术研究进展

蔡炜铭[1]，任青颖[1,2]*，江彦虎[1]，魏鸿飞[1]，彭俊越[1]，常春耘[2]，薛　梅[1,2]

（南京邮电大学 1. 电子与光学工程学院；2. 电子科学与技术国家级实验教学示范中心，南京 210023）

摘　要： 微光电子机械系统(MOEMS)气体传感技术是光学式气体传感器技术与 MOEMS 技术、新材料技术相结合的创新型技术方案。MOEMS 气体传感器具有更低的价格、更高的集成度、更强的抗干扰能力，以及更高的测试精度。文章首先阐述了主要的光学气体传感系统的工作原理及系统结构，随后介绍了 MOEMS 气体传感技术中最新的微光学器件及微光学系统。通过对 MOEMS 气体传感器的主要研究成果和进展的综述，对未来 MOEMS 气体传感器的研究重点和研究挑战等进行了展望。

关键词： 微光电子机械系统；气体传感器；光谱分析

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1040－09

Advances in the Research on MOEMS Gas Sensing Technology

CAI Weiming[1], REN Qingying[1,2], JIANG Yanhu[1], WEI Hongfei[1],
PENG Junyue[1], CHANG Chunyun[1,2], XUE Mei[1,2]

(1. College of Electronic and Optical Engineering; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Electronic Science and Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, CHN)

Abstract: MOEMS gas sensing technology is an innovative technological solution for optical gas sensing techniques combined with MOEMS technology and new materials. MOEMS gas sensor has many advantages such as lower cost, higher integration, stronger anti-interference, higher test accuracy and so on. Firstly, the structure and working principle of primary optical gas sensing systems were introduced. Subsequently, the latest achievements, microoptical devices and microoptical system in MOEMS gas sensing technology were introduced. Taking the current research status of the MOEMS gas sensing devices as clue, challenges and priorities of MOEMS gas sensor were discussed.

Key words: MOEMS; gas sensors; spectral analysis

0　引言

气体传感器常用于探测可燃、易燃、有毒气体的浓度或其存在与否，在煤矿、石油、化工、市政、医疗、交通运输、家庭等安全防护领域的需求与日俱增。气体传感器按其技术种类，主要可以分为半导体型气体传感器、电化学型气体传感器、光学气体传感器、接触燃烧式气体传感器。其中基于光学信号的光学气体传感器[1]与其他类型气体传感器相比，测量过程中传感探头对待测气体不产生影响，具有传输功率损耗小、响应速度快(时间常数可低于 1 s)、抗电磁干扰能力强以及气体分辨率较高的优点，是气体传感器技术的一个重要分支，但传统的光谱仪系统易受冲击和振动影响，功耗高、尺寸大、不便于二次开发，同时精密的光学结构也决定了其高昂的使用及维护成本[2]，使其应用受到极大限制。与传

收稿日期：2022－11－19.

基金项目：国家自然科学基金项目(61904089)；江苏省自然科学基金项目(BK20190731)；南京邮电大学教改项目(JG10621JX28).

* **通信作者：**任青颖　**E-mail：**rgy@njupt.edu.cn

统系统相比，微光电子机械系统（Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems，MOEMS）技术的推广对于批量生产小型化和高可靠性的光学的系统提供了技术支持。MOEMS 技术是一种将微机电系统（Micro-Electro-Mechanical System，MEMS）技术引进到光电子中的新技术[3]，图 1 给出了 MOEMS 与 MEMS、光电子学和微电子学的关系图。

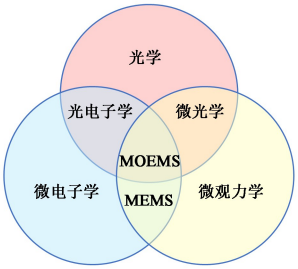


图 1　微观力学、光学和微电子学关系图

借助 MEMS 技术可以有效减小光学式气体传感器系统的体积，利用机电控制方法（如静电、磁或热效应）实现内部微器件的精确运动或变形，最终使系统具有独特的光学功能，提高系统性能，并降低系统总能耗[4]。光学式传感器工作原理主要包括吸收光谱式、光干涉式、荧光光谱式、光电比色式、离子电流式等等[5]。吸收光谱式气体传感器技术相对成熟度高，产量最大，应用最广，常用于 CO_2，CO，CH_4，NO_2，以及 C_2H_2 等气体的高精度检测，其优点是具有简单可靠的气室结构，调换光源对应不同的吸收光谱就可以实现检测不同的气体。但传统的吸收光谱式气体传感器大多以大型分析仪器为主，分析设备系统复杂且价格昂贵，具有效率低、精度差的共性问题。本文主要综述吸收光谱式光学气体传感器及系统关键组件与 MOEMS 技术结合方面的最新研究进展。

1　传感器原理和结构

1.1　工作原理

吸收光谱式气体传感器的吸收光度与待测气体的浓度有关，通过检测透射光的光强变化可以实现不同气体浓度检测[6]。根据朗伯-比尔定律，投射光强 $I(\lambda)$：

$$I(\lambda)=I_0(\lambda)\exp[-Lc\sigma(\lambda)] \tag{1}$$

式中，$I_0(\lambda)$为光源发射的入射光强，L 和 c 分别为光路长度和气体浓度，$\sigma(\lambda)$为与波长有关的被测气体吸收截面。吸收截面是吸收光子的有关电子跃迁部分的面积，其单位为 cm^2/molecule，面积越大表示吸收能力越大。其中的气体浓度可表示为

$$c=\ln(I_0(\lambda)/I(\lambda))/(L\sigma(\lambda)) \tag{2}$$

定义 D_O 为被测物质的光学厚度（Optical Depth），或者光学密度（Optical Density），表示为

$$D_O=\ln(I_0(\lambda)/I(\lambda))=L\sigma(\lambda)c \tag{3}$$

将其代入气体浓度计算公式(2)得到

$$c=D_O/(L\sigma(\lambda)) \tag{4}$$

因此，已知光源的入射光强，即无任何气体吸收时探测器所接收的光强，又称为零光谱，再获得通过被测气体后的透射光谱，则根据式(4)可以得到气体浓度。由于各种气体组分和浓度在不同波段对应于光的特征吸收光谱不同，进而最终实现对气体的定性、定量测量。

吸收光谱式气体传感器根据探测吸收的响应波段进行技术分类，如图 2 所示[7]，具体可以分为紫外和可见光波段的差分光学吸收光谱技术[8]（Differential Optical Absorption Spectroscopy，DOAS）、可见光和近红外波段的差分吸收激光雷达技术[9]（Differential Laser Absorption Radar，DIAL）、中红外波段的非分散红外光谱技术[10]（Non-Dispersive Infrared，NDIR）、红外波段的傅里叶变换红外光谱技术（Fourier Transform Infrared，FTIR），以及既可对可见光波段进行检测又可以对红外波段进行检测的可调谐二极管激光吸收光谱技术（Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy，DLAS）。表 1 给出了具体的气体检测方案以及其检测性能指标。

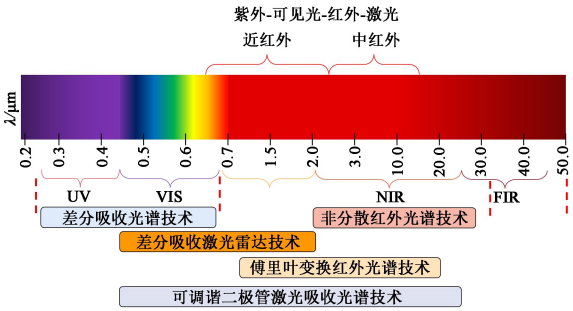


图 2　基于气体光谱分析技术的分类示意图[8]

表 1 不同气体光学检测性能指标的比较

气体种类	波长	光路长度	响应时间	吸光率	吸收系数	最小浓度	采用的技术	参考文献
NH_3	190～230 nm	150 m	1 s	5×10^{-5}	3×10^{-9} cm^{-1}	0.15ppm m	DOAS	11
	1.532 μm	36 m	30 s	1.4×10^{-4}	3.9×10^{-8} cm^{-1}	0.2 ppm	Direct TDLS	12
	1.532 μm	4 cm	10 s	4×10^{-8}	1.3×10^{-10} cm^{-1} · W · Hz$^{-1/2}$ 1×10^{-8} cm^{-1}	50 ppb	Direct TDLS PAS	13
	9.7 μm	1.6 m	5 s	—	—	80 ppm	NDIR	14
	10.34 μm	76 m	1 s	—	—	0.2 ppb	Direct TDLS	15
C_6H_6	239～302 nm	740 m	120 s	1.4×10^{-2}	1.9×10^{-7} cm^{-1}	0.54 ppb	DOAS	16
	14.8 μm	10 cm	1 s	—	—	11.5 ppm	Direct TDLS	17
CO_2	1.532 μm	3 m	6 s	3.5×10^{-5}	1.2×10^{-7} cm^{-1}	—	2fWMS	18
	1.605 5 μm	15.2 m	1.9 s	3.8×10^{-5} Hz$^{-1/2}$	2.5×10^{-8}cm^{-1} · Hz$^{-1/2}$	590 ppm	Direct TDLS	19
	4.2 μm	24 mm	<1 s	—	—	1 600 ppm	NDIR	20
	4.2 μm	1.4 mm	10 s	—	—	100 ppm	Correlation	21
	4.2 μm	40 mm	0.1 s	$<10^{-3}$	$<2.5\times10^{-4}$ cm^{-1}	25 ppm	NDIR	22
	4.24 μm	1 m	20 s	—	—	16 ppb	FTIR, waveguide	23
CO	1.582 μm	1 m	1 s	6.4×10^{-7}	6×10^{-9} cm^{-1}	5 ppm	2fWMS, balanced receiver	24
	4.94 μm	1 m	40 s	—	—	<400 ppm	Direct TDLS	25
	4.4～4.8 μm	30 cm	3 s	1.7×10^{-3}	5.7×10^{-5} cm^{-1}	1.1 ppm m	Direct TDLS	26
H_2CO	3.5 μm	18 m	13 s	2×10^{-4}	1×10^{-7} cm^{-1}	30 ppb	Direct TDLS, DFG	27
CH_4	1.66 μm	≥12 cm	—	～2×10^{-3}	～2×10^{-4} cm^{-1}	100 ppm	NDIR	28
	1.648 2 μm	74 m	1.5～10 s	4～8×10^{-5}	—	0.1 ppm	Direct TDLS, Herriott	29
	1.654 μm	252 m	2 s	—	—	20 ppb	Direct TDLS, Herriott	30
	3.3 μm	～4 cm	105 s	—	—	170 ppm	NDIR	31
	3.3 μm	1.4 mm	10 s	—	—	5 ppm	Correlation	21
	7.7 μm	1 m	20 s	—	—	520 ppb	FTIR, waveguide	23
	8.03 μm	76 m	1 s	4.6×10^{-5} Hz$^{-1/2}$	6.1×10^{-9} cm^{-1} · Hz$^{-1/2}$	1 ppb	Direct TDLS, Herriott	15
NO	200～230 nm	—	3.4 s	—	—	5 ppm	DOAS	32
	1.81 μm	68 cm	10 s	4.8×10^{-6}	7×10^{-8} cm^{-1}	100 ppm	Direct TDLS	33
	5.4 μm	50 cm	0.04 s	9×10^{-4}	1.8×10^{-5} cm^{-1}	0.5 ppm m, 1 ppm	Direct TDLS	34
	5.26 μm	76 m	1 s	—	—	0.3 ppb	Direct TDLS	15
	5.263 μm	70 m	30 s	1.4×10^{-6}	2×10^{-10} cm^{-1}	0.1 ppb Hz$^{-1/2}$	Direct TDLS	35
N_2O	4.46 μm	76 m	1 s	～2%	—	0.38 ppb	Direct TDLS, Herriott	15
	5.4 μm	50 cm	0.04 s	～5×10^{-5}	～10^{-6} cm^{-1}	10 ppmm, 20 ppm	Direct TDLS	34
	6.2 μm	4 m	10 s	—	—	2 ppm	NDIR, White	36
	7.87 μm	76 m	1 s	—	—	0.16 ppb	Direct TDLS, Herriott	15
NO_2	400～450 nm	60 m	500 s	2×10^{-4}	3×10^{-8} cm^{-1}	14 ppm	DOAS	37
	639 nm	50 cm	0.1 s	6.6×10^{-7}	1.3×10^{-8} cm^{-1}	5 ppb m, 10 ppb	Direct TDLS	38
	6.23 μm	40 m	1 s	6.4×10^{-6}	1.6×10^{-7} m^{-1}	75 ppt	2f WMS, White	39
SO_2	290～310 nm	19 cm	60 s	—	—	0.4 ppm	Correlation	40
	7.505 μm	1.44 m	10 s	1.8×10^{-4} Hz$^{-1/2}$	1.25×10^{-6} cm^{-1} · Hz$^{-1/2}$	2 ppm m Hz$^{-1/2}$	Direct TDLS	41
H_2O	833.6 nm	350 m	2 ms	6×10^{-5}	1.7×10^{-9} cm^{-1}	1 ppm	CRDS	42
	1.997 μm	20 m	1.7 s	—	—	—	Direct TDLS, Herriott	24

1.2 传感系统结构

吸收光谱式气体传感器是光谱分析技术与现代光学技术相结合的产物。由于其原理简单，其系统的基本构成组件也相对较少，主要包括光源，气室，反射光路，干涉仪（动镜、定镜、分束器），光探测器，调理电路。而为了消除光源不稳定或者环境不稳定，常常需要添加一个探测器作为参考单元。参考探测器的输出与待测气体的等效通道输出的光强度进行比较，将这两种强度归一化并进行相减就可以计算出待测气体吸收的波长处的光吸收状态[43]。图 3 给出了基于 NDIR 技术改进的相关光谱测试的系统图以及光路上不同位置的光谱特征，系统中的光源采用的是 LED 紫外光源（UVTOP300, Roithner Lasertechnik），波长中心在 300 nm 左右，波长宽度约为 12 nm，覆盖大约八个显著的 SO_2 吸收峰。探测光通过待测气体气室（长 19 cm）再经过分束器（80%和 20%）聚焦到两个探测器（DET110, Thorlabs）上，其中参考光通过充满 10 000 ppm SO_2 气体的参考气室（长 15 cm）。探测器通过数据采集卡（PCI-6133, NI）传输到计算机上，使用 Labview 实现数据采集和分析。两路测量曲线，可以生成一个校准曲线，实现对未知气体浓度的测量。

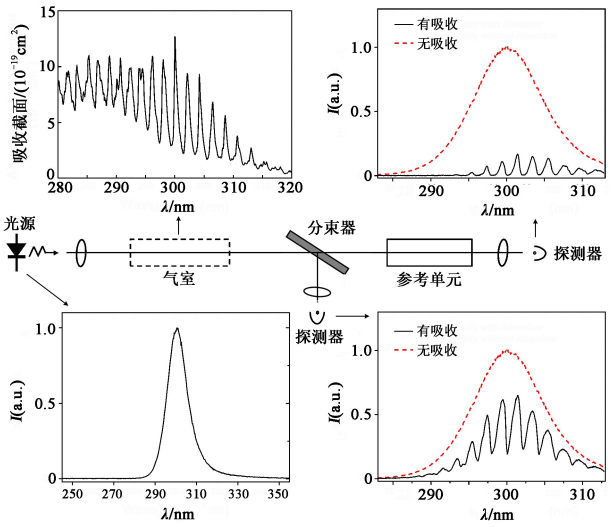


图 3　SO_2 气体相关光谱测试系统及光路上不同位置处的光谱[45]

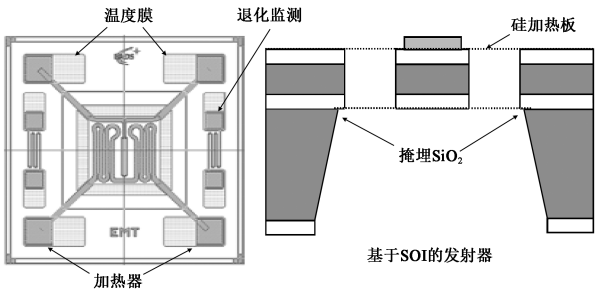
2　传感器中的 MOEMS 组件

2.1　光发射器件

吸收光谱式气体传感光源通常采用半导体光源，包括发光二极管、激光二极管和分布反馈式半导体激光器。

传统的吸收光谱式气体传感器中使用的光源发射率相对较高且成本低，如文献中报道的一款基于 NDIR 技术的气体传感器的光源发射功率为 2 mW/sr，成本仅需 1～2 美元[44]。但其发射的波段包含相当大比例的可见光和短波红外辐射，在作为气体探测应用使用过程中，这种额外的光信号将会出现干扰的检测信号。另一个问题是这种光源限制电调制频率在 10 Hz，而该频率在信号读取识别过程中会引入噪声干扰。开发更高效率及实现更快的调制频率的光源是光源器件发展的趋势。

大量研究都是从材料和光源器件结构方面入手。材料方面，由于间接带隙半导体辐射跃迁几率小，而且载流子注入造成的损耗高，研究中常选用能够发射所需波长光的直接带隙半导体材料。日本 Tohoku 大学的 Chan 等用 LED 作为宽带光源，配合窄带干涉滤光片，对甲烷气体在 1 331.2 nm 附近的 Q 线进行检测，系统最小可探测灵敏度为 25%LEL(气体爆炸下限)。其后，又用 InGaAs LED 作为光源检测到甲烷气体在 1 665.4 nm 处的谐波吸收峰，由于 1 665.4 nm 处的谐波吸收峰吸收强度较 1 331.2 nm 处大一倍，即提高了测试精度[45]。结构方面，MOEMS 实现的光源发生器可以加工在陶瓷基底或者硅基底上，由于器件体积小，热质量低，可以实现快速调制。如图 4 给出的是用绝缘层上硅(Sillicon On Insulator，SOI)的微加工技术制备的红外发射器实例[46]。该发射器件具有弯曲的加热条，并集成可以实时检测芯片温度的温度传感器。截面图展示出器件是悬膜结构，采用悬膜结构可以有效减少衬底带来的热损耗，支撑梁是 SiO_2 和 Si_3O_4 复合结构，SOI 基底可以简化悬膜释放工艺[47]，悬浮结构的释放将决定器件的成品率和均匀性，可采用 KOH 湿法腐蚀和 XeF_2 干法刻蚀复合加工实现均匀性的释放。大量研究表明，辐射层的制备和改性对于光源器件的性能影响很大，SnO_2：Sb 薄膜改性后的发射器件在高温下具有长期稳定性，如在 950 ℃下的寿命可达 10 年[48]；辐射层厚度与目标气体波长有相似的尺度，可以提高光谱效率。Puscasu 等实现 1 600 ppm 检测极限的 CO_2 浓度检测在 0.25～6.0 μm 波段范围内的吸收率均可达到 90%以上[49]。近年来，纳米技术的发展进一步提升了辐射层的性能。Liu 等研究表明，制备纳米级硅作为新型的低反射纳米材料，在 NIR 波段上表现出接近 1 的发射率[50]。



(a)　俯视图　　(b)　截面图

图 4　MEMS 表面加工工艺制备的红外发射器俯视图和截面图[46]

2.2　微镜器件

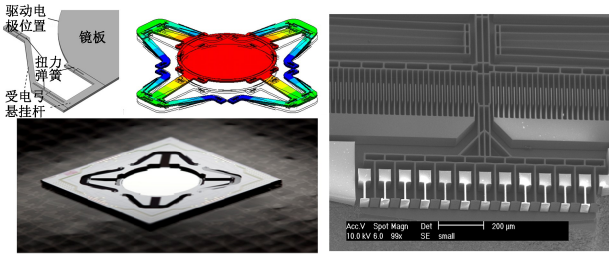
微镜是典型的 MOEMS 执行器件，用在 MOEMS 光学气体传感器系统中可以实现平移和转动控制光程长度调制，甚至可以替代分光器将光分裂成两束，在相位移动后再重新组合输出干涉图进而得到光谱信息。微镜器件对于冲击和振动的不敏感性使其在实际应用中具有很大的吸引力[51]。基于 MOEMS 微镜或微镜阵列根据光学工作原理可以分为反射、折射或衍射(光栅)三类，可以通过微加工、表面微加工或混合制造加工硅微机械加工工艺得到。最终通过静电方式[52]、电磁方式[53]、压电

方式[54]和热电方式[55]进行驱动，各种驱动的性能在表 2 中进行对比。

表 2 基于不同驱动模式的 MEMS 微镜性能比较

特性分类	静电驱动	电磁驱动	压电驱动
易于制造	优	优	良
扫描角度大	良	优	差
功耗低	良	差	优
驱动电压低	差	优	良
体积紧凑	优	差	优
线性度	良	优	良

常见的微镜结构具有镜面状和梳状两种。运动的形式包括平面外移动、平面内移动以及旋转三种。Thilo Sandner 等报道的一种用于小型 FTIR 光谱仪的 MOEMS 微镜，可以实现快速光程长度调制。如图 5(a)所示，直径为 5 mm 的镜板由四个弓型梁支撑，在 30 Pa，50 V 静电驱动电压下实现高达 ±600 μm 的振幅平面外平移振荡。该 MOEMS 器件采用 CMOS 兼容的 SOI 工艺制造。Danick Briand 等报道的光谱仪中使用的具有固定微镜和可动微镜阵列对，如图 5(b)所示。整个微镜阵列排列成具有可变深度的光栅。以零阶反射回来的光将作为光栅深度的函数进行调制(即固定系列的反射镜和可移动的反射镜之间的距离)产生相位延迟，从而产生干涉图。该仪器每秒能测量 400 个光谱，在 10 s 的测量时间内信噪比高达 18 000∶1。该微镜采用 SOI 硅片的表面微加工工艺实现，结合 DRIE 腐蚀实现静电梳状驱动执行器和反射镜。



(a) (b)

图 5 平面外平移振荡的 MOEMS 微镜(a)和平面内移动振荡的梳齿装 MOEMS 微镜(b)

微镜的研究重点主要是通过改进和优化工艺和结构，实现更高的振荡振幅和更小的光孔径，以提高系统的光谱分辨率和信噪比。还有研究致力于分离不同的振荡模式。另有研究表明，将 MOEMS 微镜进行原片级真空封装，将会大大提高微镜的器件性能以适应更高的探测需求[56]。

2.3 微光开关

MOEMS 光开关主要指基于 MEMS 加工技术的新型机械式光开关[57]，主要用于微镜和镜面阵列的形式切换、组装光学交叉连接(OXC)、光分插复用(OADM)、光路通断等等。传统机械开关基于宏观体光学，利用自由空间光学的优点。然而尺寸大、质量大、开关速度慢使得其在高速光传导和通信过程中受限很大。导波固态开关则由于其高损耗和高串扰限制了它们的可扩展性。MOEMS 光开关与 IC 兼容，可靠性高、耦合损耗低、隔离度高、速率与调制方式无关的特点，可扩展性强，易于实现具有可重构无阻塞大规模光开关阵列，成为高速大容量光网络中光开关发展的主流方向[58]。

Aksyuk 推出的著名的 Wave Star 光学开关是最早的商业化应用比较成熟的 MOEMS 光开关，如图 6 所示，直径为 500 μm 的圆形微镜悬挂在固定框架上，通过支撑铰链侧壁可以实现平面旋转 90°，多晶硅层和氧化牺牲层的厚度均为微米量级。反射面由二组环组件支撑旋转，使反射面可以围绕第二个正交轴相对于环旋转，从而实现两个倾斜自由度。扭转弹簧由折叠的蛇形多晶硅梁组成，保障切换时间在几毫秒，同时保障结构与机械振动和低频噪声解耦。多晶硅反射面上淀积金膜，以确保在较宽的波长范围内具有良好的反射率[59]。Toshiyoshi[60]报道了利用硅微加工工艺实现的 MOEMS 光纤开关 2×2 阵列，利用静电驱动的微反射镜来调节光束方向。反射镜由施加的偏置电压的静电力控制。利用准直光束光纤进行光耦合，获得了具有大的通断对比度(60 dB)、小串扰(−60 dB)、小插入损耗(<−7.66 dB)的光开关。随着 MEMS 工艺的成熟，特别是纳米加工工艺的成熟，更快更小的光开关成为研究热点。Christian 等在 Science 上报道了在纳米机械混合型光子开关。利用光电效应，通过对金薄膜进行静电微扰，形成气隙混合光子-等离基元波导的纳米级，将等离激元部分限制在高度可变的气隙中产生很强的光-电-机械效应，而其余部分的光子限制可以将光学损失降至最低，在 CMOS 级电压下实现低光学损耗(0.1 dB)、数十纳秒响应速度的光开关[61]。

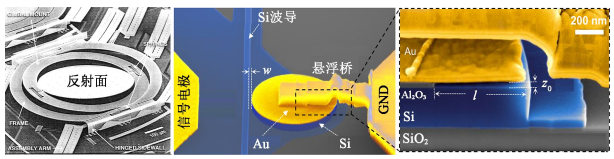
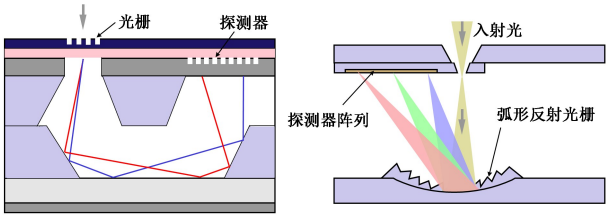


图 6 微米尺度和纳米尺度的 MOEMS 光开关器件

2.4　微光谱仪

光谱仪通常由一个或几个衍射光栅、光路和一个探测器阵列构成。从微加工的微光谱仪实现方面，光学元件的质量和系统光对准直接影响分辨率。在气体探测应用方面，气路长度是影响检测气体灵敏度的一个重要因素。气路结构大致可分为单光程吸收透射检测和反射检测（包含怀特腔多次反射），怀特腔的多次反射增加了吸收路径长度，可以提高气体检测灵敏度，但多次反射也会造成整个系统易受振动的影响[62]。

图 7 给出了两种微光谱仪结构。Kwa 开发的凹槽式光路微光谱仪通过键合工艺获得了约 4 mm 长度的光路，光栅和探测阵列都可以直接加工在顶层硅片上，光源经过衍射光栅后的散射光投射到光电二极管阵列上，该结构对于光对准的要求比较高[63]。光栅式微光谱仪利用光从不同的角度分散和聚焦到探测器阵列上的不同位置，避免了复杂精准光对准以及多个反射面的要求，简化了系统工艺。

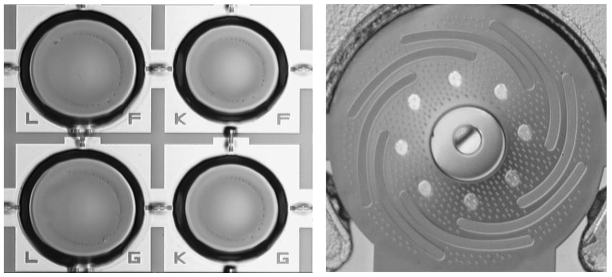


（a）　凹槽式光路　　（b）　光栅式光路

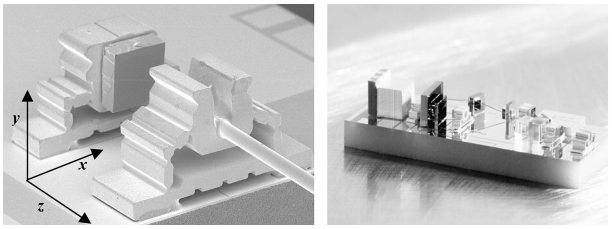
图 7　微光谱仪的两种光路

图 8 所示的 Axsun 技术公司商业开发可用于 C_2H_2 气体检测的传感系统，该系统的底座长度为 14 mm 的氮化铝光学台。通过光纤将传输或反射的光送回光谱仪，InGaAs 探测器和阻抗放大器将光转换成电信号进行处理[64]。

Mazen 等先后报道了基于近红外（NIR）光谱范围内的气体检测[65]和中红外（MIR）的 MOEMS 光谱仪。图 9 是利用中红外光谱对于 CO_2 气体浓度进行检测，是一款对环境湿气不敏感的FTIR微光谱仪。该光谱仪通过绝缘体上硅的深度蚀刻技术加工而成。在波长为 4 250 nm 时，测量的信噪比（SNR）为 24 dB，光谱分辨率约为 60 cm^{-1}。在环境空气中检测到的 CO_2 浓度约为 400 ppm[66]。



（a）　微透镜　　（b）　MEMS 滤波器



（c）　光纤准直器

图 8　集成光纤的光学气体传感系统

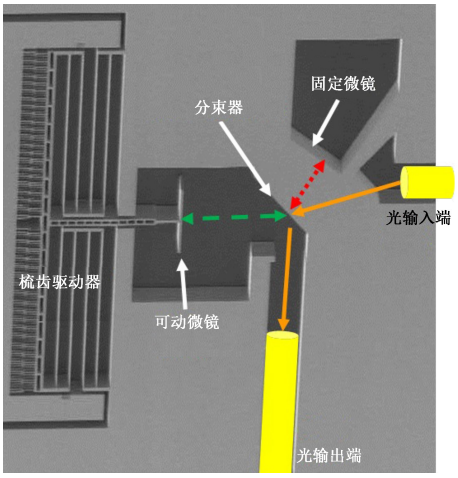


图 9　FTIR 光学气体传感器

3　结论及展望

本文首先针对 MOEMS 光学气体传感系统进行了理论和系统介绍，综述了几种光学探测方法对不同气体检测的性能指标。随后，总结分析了 MOEMS 光学气体传感器用到的基本系统组件，包括光发射器、微镜、微开关以及微光谱仪等方面的发展动态和研究方向。

目前新型 MOEMS 气体传感器技术领域依然以传统宏观组件为主，而关于 MOEMS 技术应用则主要集中在系统功能组件的设计和开发上，其气体系统微型化设计和集成加工还处在起步阶段。除了 MOEMS 气体传感器功能组件之外，专用管壳内组合封装可以实现对于冲击、振动包括干扰气体的过滤，对于 MOEMS 气体传感器的性能影响较大。

综上所述，发展新材料、新工艺、新结构是 MOEMS 气体传感未来重点关注的方向。此外，大部分的 MOEMS 气体传感器系统采用板级电路，因

此 MOEMS 气体测量技术的专用集成电路亦是未来的重点发展方向之一。

参考文献：

[1] 马须敬，徐 磊. 气体传感器的研究现状与发展趋势[J]. 传感器与微系统，2018，37(5)：1-4.
Ma Xujing，Xu Lei. Research status and development trend of gas sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2018，37(5)：1-4.

[2] Chen S，Zhang Y，Hong X，et al. Technologies and applications of silicon-based micro-optical electromechanical systems：A brief review[J]. J. of Semiconductors，2022，43(8)：081301-1-081301-9.

[3] Majhi S M，Mirzaei A，Kim H W，et al. Recent advances in energy-saving chemiresistive gas sensors：A review[J]. Nano Energy，2021，79：105369.

[4] Hagleitner C，Hierlemann A，Lange D，et al. Smart single-chip gas sensor microsystem[J]. Nature，2001，414(6861)：293-296.

[5] Schroeder H，Scheel W. MOEMS：technology，packaging，and optical interconnection[J]. Proc. SPIE，2001，4284：122-131.

[6] Bogue R. Recent developments in MEMS sensors：A review of applications，markets and technologies[J]. Sensor Review，2013，33(4)：300-304.

[7] Li J Y，Yang S，Du Z H，et al. Quantitative analysis of ammonia adsorption in Ag/AgI-coated hollow waveguide by mid-infrared laser absorption spectroscopy[J]. Optics and Lasers in Engineering，2019，121：80-86.

[8] Wang J，Xie P，Li A，et al. Measurement of ammonia by a portable UV-DOAS gas sensor based on multi-pass cell[J]. Advanced Proc. SPIE，2010，7853：631-640.

[9] 成 远，张 振，华灯鑫，等. NO_2 差分吸收激光雷达技术研究进展[J]. 量子电子学报，2021，38(5)：580-592.
Cheng Yuan，Zhang Zhen，Hua Dengxin，et al. Research progress of NO_2 differential absorption Lidar [J]. J. of Quantum Electronics，2021，38(5)：580-592.

[10] Puton J，Jasek K，Siodłowski B，et al. Optimisation of a pulsed IR source for NDIR gas analysers[J]. Opto-electronics Review，2002，10(2)：97-103.

[11] Mount G H，Rumburg B，Havig J，et al. Measurement of atmospheric ammonia at a dairy using differential optical absorption spectroscopy in the mid-ultraviolet [J]. Atmospheric Environment，2002，36(11)：1799-1810.

[12] Claps R，Englich F V，Leleux D P，et al. Ammonia detection by use of near-infrared diode-laser-based overtone spectroscopy[J]. Appl. Opt.，2001，40(24)：4387-4394.

[13] Huszár H，Pogány A，Bozóki Z，et al. Ammonia monitoring at PPB level using photoacoustic spectroscopy for environmental application[J]. Sensors and Actuators B：Chemical，2008，134(2)：1027-1033.

[14] Fonollosa J，Halford B，Fonseca L，et al. Ethylene optical spectrometer for apple ripening monitoring in controlled atmosphere store-houses[J]. Sensors and Actuators B：Chemical，2009，136(2)：546-554.

[15] McManus J B，Shorter J H，Nelson D D，et al. Pulsed quantum cascade laser instrument with compact design for rapid，high sensitivity measurements of trace gases in air[J]. Appl. Phys. B，2008，92(3)：387-392.

[16] Lee C，Choi Y J，Jung J S，et al. Measurement of atmospheric monoaromatic hydrocarbons using differential optical absorption spectroscopy：Comparison with on-line gas chromatography measurements in urban air[J]. Atmospheric Environment，2005，39(12)：2225-2234.

[17] Chen W，Cazier F，Tittel F，et al. Measurements of benzene concentration by difference-frequency laser absorption spectroscopy[J]. Appl. Opt.，2000，39(33)：6238-6242.

[18] Fetzer G J，Pittner A S，Ryder W L，et al. Tunable diode laser absorption spectroscopy in coiled hollow optical waveguides[J]. Appl. Opt.，2002，41(18)：3613-3621.

[19] Kasyutich V L，Martin P A. Multipass optical cell based upon two cylindrical mirrors for tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Appl. Phys. B，2007，88(1)：125-130.

[20] McNeal M P，Moelders N，Pralle M U，et al. Development of optical MEMS CO_2 sensors[J]. Proc. SPIE，2002，4815：30-35.

[21] Vargas-Rodríguez E，Rutt H N. Design of CO，CO_2 and CH_4 gas sensors based on correlation spectroscopy using a Fabry-Perot interferometer[J]. Sensors and Actuators B：Chemical，2009，137(2)：410-419.

[22] Aleksandrov S E，Gavrilov G A，Kapralov A A，et al. Simulation of characteristics of optical gas sensors based on diode optopairs operating in the mid-IR spectral range[J]. Technical Phys.，2009，54(6)：874-881.

[23] Kim S S，Menegazzo N，Young C，et al. Mid-infrared trace gas analysis with single-pass Fourier transform infrared hollow waveguide gas sensors[J]. Appl. Spectroscopy，2009，63(3)：331-337.

[24] Engelbrecht R. A compact NIR fiber-optic diode laser spectrometer for CO and CO_2：Analysis of observed $2f$ wavelength modulation spectroscopy line shapes [J]. Spectrochimica Acta Part A：Molecular and Biomolecular Spectroscopy，2004，60(14)：3291-3298.

[25] Thorpe M J，Balslev-Clausen D，Kirchner M S，et al. Cavity-enhanced optical frequency comb spectroscopy：application to human breath analysis[J]. Opt. Express，2008，16(4)：2387-2397.

[26] Barron-Jimenez R，Caton J A，Anderson T N，et al. Application of a difference-frequency-mixing based diode-laser sensor for carbon monoxide detection in the 4.4～4.8 μm spectral region[J]. Appl. Phys. B，2006，85(2)：185-197.

[27] Lancaster D G, Richter D, Curl R F, et al. Real-time measurements of trace gases using a compact difference-frequency-based sensor operating at 3.5 μm[J]. Appl. Phys. B: Lasers & Optics, 1998, 67(3): 339-345.

[28] Massie C, Stewart G, McGregor G, et al. Design of a portable optical sensor for methane gas detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2006, 113(2): 830-836.

[29] Gurlit W, Zimmermann R, Giesemann C, et al. Lightweight diode laser spectrometer CHILD (Compact High-altitude In-situ Laser Diode) for balloonborne measurements of water vapor and methane[J]. Appl. Opt., 2005, 44(1): 91-102.

[30] Richard E C, Kelly K K, Winkler R H, et al. A fast-response near-infrared tunable diode laser absorption spectrometer for in situ measurements of CH_4 in the upper troposphere and lower stratosphere[J]. Appl. Phys. B, 2002, 75(2): 183-194.

[31] Alexandrov S E, Gavrilov G A, Kapralov A A, et al. Portable optoelectronic gas sensors operating in the mid-IR spectral range (lambda=3～5 μm)[J]. Proc. SPIE, 2002, 4680: 188-194.

[32] Dooly G, Fitzpatrick C, Lewis E. Deep UV based DOAS system for the monitoring of nitric oxide using ratiometric separation techniques[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2008, 134(1): 317-323.

[33] Sonnenfroh D M, Allen M G. Absorption measurements of the second overtone band of NO in ambient and combustion gases with a 1.8 μm room-temperature diode laser[J]. Appl. Opt., 1997, 36(30): 7970-7977.

[34] Sonnenfroh D M, Rawlins W T, Allen M G, et al. Application of balanced detection to absorption measurements of trace gases with room-temperature, quasi-CW quantum-cascade lasers[J]. Appl. Opt., 2001, 40(6): 812-820.

[35] McManus J B, Nelson D D, Herndon S C, et al. Comparison of CW and pulsed operation with a TE-cooled quantum cascade infrared laser for detection of nitric oxide at 1 900 cm^{-1}[J]. Appl. Phys. B, 2006, 85(2): 235-241.

[36] Crowder J G, Hardaway H R, Elliott C T. Mid-infrared gas detection using optically immersed, room-temperature, semiconductor devices[J]. Measurement Science and Technol., 2002, 13(6): 882-884.

[37] Cheng A Y S, Chan M H. Acousto-optic differential optical absorption spectroscopy for atmospheric measurement of nitrogen dioxide in Hong Kong[J]. Appl. Spectroscopy, 2004, 58(12): 1462-1468.

[38] Sonnenfroh D M, Allen M G. Ultrasensitive, visible tunable diode laser detection of NO_2[J]. Appl. Opt., 1996, 35(21): 4053-4058.

[39] Reid J, El-Sherbiny M, Garside B K, et al. Sensitivity limits of a tunable diode laser spectrometer, with application to the detection of NO_2 at the 100-PPT level[J]. Appl. Opt., 1980, 19(19): 3349-3354.

[40] Lou X T, Somesfalean G, Zhang Z G, et al. Sulfur dioxide measurements using an ultraviolet light-emitting diode in combination with gas correlation techniques[J]. Appl. Phys. B, 2009, 94(4): 699-704.

[41] Rawlins W T, Hensley J M, Sonnenfroh D M, et al. Quantum cascade laser sensor for SO_2 and SO_3 for application to combustor exhaust streams[J]. Appl. Opt., 2005, 44(31): 6635-6643.

[42] Levenson M D, Paldus B A, Spence T G, et al. Optical heterodyne detection in cavity ring-down spectroscopy[J]. Chemical Phys. Lett., 1998, 290(4/6): 335-340.

[43] Lou X T, Somesfalean G, Zhang Z G, et al. Sulfur dioxide measurements using an ultraviolet light-emitting diode in combination with gas correlation techniques[J]. Appl. Phys. B, 2009, 94(4): 699-704.

[44] Smith S D, Hardaway H R, Crowder J G. Recent developments in the applications of mid-infrared lasers, LEDs, and other solid state sources to gas detection[J]. Proc. SPIE, 2002, 4651: 157-172.

[45] Chan K, Ito H, Inaba H, et al. 10 km-long fibre-optic remote sensing of CH_4 gas by near infrared absorption[J]. Appl. Phys. B, 1985, 38(1): 11-15.

[46] Spannhake J, Schulz O, Helwig A, et al. Design, development and operational concept of an advanced MEMS IR source for miniaturized gas sensor systems[C]// Proc. of IEEE Sensors(2005), 2005: 762-765.

[47] Van Campenhout J, Liu L, Romeo P R, et al. A compact SOI-integrated multiwavelength laser source based on cascaded InP microdisks[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2008, 20(16): 1345-1347.

[48] Jasek K, Puton J, Siodlowski B, et al. Platinum-black coatings for infrared emitters[J]. Proc. SPIE, 2003, 5124: 92-95.

[49] McNeal M P, Moelders N, Pralle M U, et al. Development of optical MEMS CO_2 sensors[J]. Proc. SPIE, 2002, 4815: 30-35.

[50] Liu W, Ming A, Tan Z, et al. Development of MEMS IR source by compound release process with nano-scale silicon forest radiation layer[C]// Proc. IEEE Sensors (2016), 2016: 1-3.

[51] Sandner T, Grasshoff T, Gaumont E, et al. Translatory MOEMS actuator and system integration for miniaturized Fourier transform spectrometers[J]. J. of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2014, 13(1): 011115-1-011115-13.

[52] Chu H M, Hane K. Design, fabrication and vacuum operation characteristics of two-dimensional comb-drive micro-scanner[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 165(2): 422-430.

[53] Hofmann U, Janes J, Quenzer H J. High-Q MEMS resonators for laser beam scanning displays[J].

Micromachines, 2012, 3(2): 509-528.

[54] Koh K H, Kobayashi T, Hsiao F L, et al. Characterization of piezoelectric PZT beam actuators for driving 2D scanning micromirrors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 162(2): 336-347.

[55] 章 皓. 电热式MEMS微镜驱动控制技术研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
Zhang Hao. Research on driving control technology of electric MEMS micro mirror[D]. Suzhou: Suzhou University, 2014.

[56] Ozdogan M, Daeichin M, Ramini A, et al. Parametric resonance of a repulsive force MEMS electrostatic mirror[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 265: 20-31.

[57] 李海军. 基于光通信应用的MOEMS光学无源器件技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
Li Haijun. Research on optical passive device technology of MOEMS based on optical communication application [D]. Changchun: Jilin University, 2007.

[58] Chu P B, Lee S, Park S, et al. MOEMS: enabling technologies for large optical cross-connects[J]. Proc. SPIE, 2001, 4561: 55-65.

[59] Aksyuk V A, Pardo F, Bolle C A, et al. Lucent Microstar micromirror array technology for large optical crossconnects [J]. Proc. SPIE, 2000, 4178: 320-324.

[60] Toshiyoshi H, Fujita H. Electrostatic micro torsion mirrors for an optical switch matrix[J]. J. Microelectromechanical Systems, 1996, 5(4): 231-237.

[61] Haffner C, Joerg A, Doderer M, et al. Nano-opto-electro-mechanical switches operated at CMOS-level voltages[J]. Science, 2019, 366(6467): 860-864.

[62] Yang Z, Albrow-Owen T, Cai W, et al. Miniaturization of optical spectrometers[J]. Science, 2021, 371(6528): 0722.

[63] Kwa T A, Wolffenbuttel R F. Integrated grating/detector array fabricated in silicon using micromachining techniques [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1992, 31(1/3): 259-266.

[64] Crocombe R A, Flanders D C, Atia W. Micro-optical instrumentation for process spectroscopy[J]. Proc. SPIE, 2004, 5591: 11-25.

[65] Erfan M, Sabry Y M, Sakr M, et al. On-chip micro-electro-mechanical system Fourier transform infrared (MEMS FT-IR) spectrometer-based gas sensing[J]. Appl. Spectroscopy, 2016, 70(5): 897-904.

[66] Salem A M, Sabry Y M, Fathy A, et al. Single MEMS chip enabling dual spectral-range infrared micro-spectrometer with optimal detectors [J]. Advanced Materials Technologies, 2021, 6(5): 2001013.

作者简介:

蔡炜铭(1998—),男,江西省赣州市人,硕士研究生,研究方向包括气体传感器器件设计、调理电路设计与实现;

任青颖(1987—),女,博士,讲师,研究生导师;2017年获东南大学微电子学与固体电子学工程博士学位;研究方向包括微纳传感器器件的设计和加工、二维纳米材料传感器、气体传感器等;参与或主持国家重大专项、"863"项目、国家自然科学基金项目、国家自然青年基金项目,以及江苏省青年基金项目等;以第一作者发表SCI和EI论文9篇,以第一完成人获得中国发明专利授权6项。