



## 多功能传感器集成综述

吕佩珏, 黄哲, 王晓明, 杨知雨, 林晨希, 王铭强, 杨洋, 胡然, 苟秋,  
李嘉怡, 金玉丰

(北京大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 随着 5G、智能汽车、物联网 (IoT)、智慧医疗等市场的快速增长, 其对传感器需求广泛, 要求传感器具备微型化、集成化、智能化、低功耗等特点。概述了国内外学者在环境、汽车和生物参数检测等领域应用多功能传感器集成的成果, 阐释了多功能传感器集成的工艺兼容性及其封装的关键技术, 分析了多功能传感器集成在模型仿真、产品测试和热管理方面面临的严峻挑战。对多功能传感器集成方案进行了总结, 并提出了未来发展趋势。

**关键词:** 多功能传感器; 集成; MEMS-CMOS

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1681-1070 (2023) 08-080201

**DOI:** 10.16257/j.cnki.1681-1070.2023.0098

**中文引用格式:** 吕佩珏, 黄哲, 王晓明, 等. 多功能传感器集成综述[J]. 电子与封装, 2023, 23 (8): 080201.

**英文引用格式:** LYU Peijue, HUANG Zhe, WANG Xiaoming, et al. Review of multifunctional sensor integration[J]. Electronics & Packaging, 2023, 23(8): 080201.

### Review of Multifunction Sensor Integration

LYU Peijue, HUANG Zhe, WANG Xiaoming, YANG Zhiyu, LIN Chenxi, WANG Mingqiang,

YANG Yang, HU Ran, GOU Qiu, LI Jiayi, JIN Yufeng

(Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** With the rapid growth of markets such as 5G, smart cars, internet of things (IoT) and smart healthcare, there is an extensive demand for sensors, requiring sensors to have characteristics such as miniaturization, integration, intelligence and low power consumption. The achievements of domestic and international scholars in the application of multifunctional sensor integration in the fields of environment, automotive and biological parameter detection are outlined, the key technologies of process compatibility and packaging for multifunctional sensor integration are explained, and the severe challenges of multifunctional sensor integration in terms of model simulation, product testing and thermal management are analyzed. The multifunction sensor integration solutions are summarized and the future development trends are proposed.

**Keywords:** multifunction sensors; integration; MEMS-CMOS

## 1 引言

近年来,随着电子产品不断向着小型化、移动化的方向发展,对多传感器进行集成逐渐成为了研究热点。多传感器的集成可以让传感器系统拥有更紧凑的体积、更低的功耗以及更好的性能,让传感器系统在一个封装体中可以同时实现多种物理和化学参数的测量。

由于传感器的配置和测量机制不同,已有不同的方案来实现多个传感器的集成,包括片上系统(SoC)与系统级封装(SiP)。片上系统,顾名思义是在一个芯片上集成多个传感器,形成一个系统。SiP 是使多种具备不同功能器件的组合物形成一个系统或者亚系统的方法。SiP 中的模块水平排布,其结构最简单,最容易获得高良率,因而其应用也最广泛<sup>[1]</sup>。SoC 集成在尺寸、功耗、成本、性能和可靠性方面优于其他同类产品。然而,由于不同的配置、不同的传感机制、不同的制造工艺和不一样的封装方案,SoC 仍然面临一些技术挑战,只有小部分具有相似结构、传感机制和封装方案的传感器可以实现单片 SoC 集成<sup>[2]</sup>。随着小型化需求的增加,为了进一步减小体积,则需要将芯片或器件在垂直方向上进行堆叠。与水平排布相比,3D 集成能够实现更多功能,且结构更为紧凑,但其制造工艺也更加复杂。3D 集成技术在实现多传感器的可靠集成、提高系统性能、降低功耗等方面展现出了巨大的潜力。目前,台积电、英特尔、三星等顶尖半导体企业已经将 3D 集成技术视为先进工艺的重要组成部分<sup>[3-5]</sup>,3D 集成技术的重要性日益增强。虽然多传感器的集成能缩小体积、提升性能、降低产品成本,但其也面临着诸如多物理场耦合、互联传输设计、热预算、工艺兼容性、可靠性等多方面的挑战<sup>[6]</sup>。

本文概述了国内外学者在多功能传感器集成领域的成果,阐明其关键技术,指出其面临的挑战。

## 2 多功能传感器的集成现状

近年来,半导体光刻技术、微加工技术及封装技术的突飞猛进推动着传感器的不断发展。物联网(IoT)、自动驾驶、智慧医疗等应用需要许多对各种物理、化学和生物参数响应的多传感器设备。多功能集成化传感器具有小型化、结构简单和低成本等显著优势,已受到越来越多的关注。许多研究人员已经证明

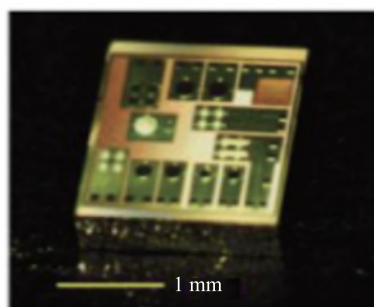
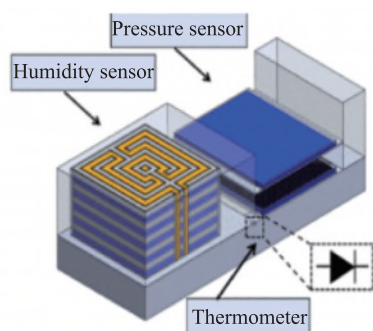
了在单个芯片上集成多个传感器的优势。多功能集成传感器的种类有很多,如集成温度/湿度/压力/气体的环境传感器、集成压力/加速度的轮胎压力监测传感器以及用于监测乳酸/葡萄糖/pH 值等生物参数的集成生物传感器。

### 2.1 环境传感器

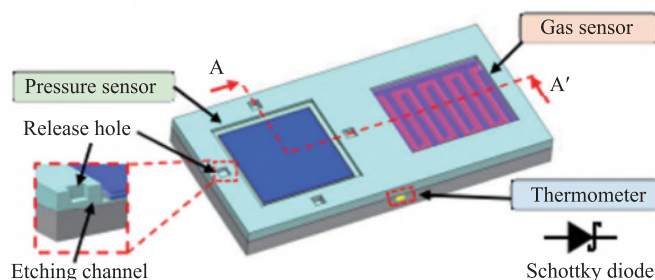
环境传感器由于其在消费品、工业和智能应用等领域中多样化的应用,一直受到广泛关注。对压力、湿度、温度和流量等环境因素的监测需求正在逐年增加。台湾清华大学的 CHANG 团队<sup>[7-9]</sup>使用 TSMC 0.18  $\mu\text{m}$  1P6M CMOS 平台和后续的 Last-CMOS 工艺制造了高性能的环境传感器。2020 年,CHANG 等采用双面 Last-CMOS 微加工工艺设计并实现了一种单片集成的湿度、温度和压力传感器<sup>[7]</sup>。通过刻蚀背面硅,使蒸汽从聚酰亚胺两侧扩散,将湿度传感器的响应时间提高了 5 倍,同时为压力传感器创造了腔室容积。该电容式相对湿度传感器的灵敏度为 4.06 fF/%RH,响应时间为 3.1 s。电容式相对压力传感器的灵敏度为 0.79 fF/kPa,二极管温度计的灵敏度为 15.8 mV/°C。图 1(a) 为采用双面 Last-CMOS 工艺制造的传感器的各向同性视图。由于空气流量信号可随温度变化,应补偿温度变化以进行准确的流量测量。二极管的温度计因其具有占地面积小、制造工艺简单、集成兼容性高的特点,在多传感器集成中被广泛应用。

此外,基于单面 Last-CMOS 微加工工艺实现了湿度、压力和温度的传感器集成中心,如图 1(b) 所示<sup>[8]</sup>。压力传感器的悬挂柔性结构和湿度传感器的传感电极通过牺牲金属层的正面刻蚀来实现。2022 年,基于内部 Last-CMOS 微加工工艺,通过金属湿法刻蚀、化学气相沉积聚对二氯甲苯和液滴铸造,实现了电容式压力传感器、二极管温度计和金属氧化物半导体气体传感器的单片集成,如图 1(c) 所示<sup>[9]</sup>。压力传感器的灵敏度为 0.23 fF/kPa,气体传感器的氧气检测响应灵敏度为  $0.06 \times 10^{-4}$ ,温度计的灵敏度为 0.82 mV/°C。

利用相同的制造工艺和集成设计来降低成本和减小尺寸是环境传感器的一大研究热点。IZHAR 等<sup>[10]</sup>利用三步掩模光刻工艺在单个芯片上实现了热阻式量热流量(TCF)传感器、湿度和温度传感器的低成本集成。其中聚对二氯甲苯既充当封装体(用于温度和流量传感器)又充当湿度传感层。此外,还制造了具有双对检测器的完全释放 TCF 传感器,以实现高灵敏度。该 TCF 传感器的最大灵敏度为 312 mV/(m·s<sup>-1</sup>)和 275 mV/(m·s<sup>-1</sup>),湿度传感器的平均灵敏度为 7.83 fF/%RH,



(a) 采用双面Last-CMOS工艺制造的传感器各向同性视图<sup>[7]</sup> (b) 基于单面Last-CMOS微加工工艺实现的传感器集成中心<sup>[8]</sup>

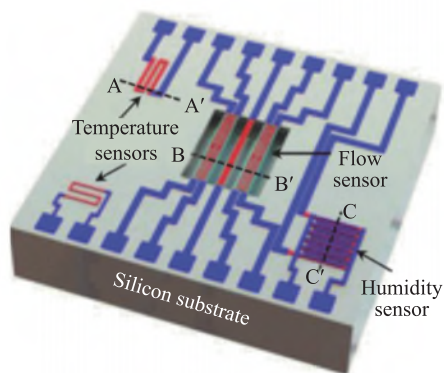


(c) 基于内部Last-CMOS微加工工艺实现的单片集成<sup>[9]</sup>

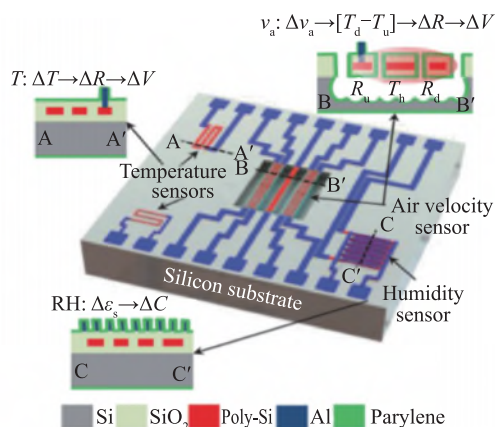
图 1 使用 TSMC 0.18  $\mu\text{m}$  1P6M CMOS 平台制造的多传感器

而温度传感器的电阻变化为  $5.78 \Omega/^{\circ}\text{C}$ , 电阻温度系数为  $1.43 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 。该芯片在 IoT 时代的智能建筑人体热舒适传感应用中很有前景。2022 年, 该团队仅用三步光刻, 实现 TCF、湿度、温度传感器的单片集成, 如图 2 (a) 所示<sup>[11]</sup>。其中, TCF 传感器使用双对检测器, 并完全从衬底释放, 以实现低功耗。团队所开发的温度传感器在双探测器模式下的灵敏度为  $20.09 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ , 湿度传感器的平均灵敏度为  $7.83 \text{ fF}/\% \text{RH}$ , TCF 传感器的灵敏度

为  $312 \text{ mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。此外, 该团队还开发了标准 TSMC 0.18  $\mu\text{m}$  1P6M CMOS 平台以及单面 Last-CMOS 微加工工艺, 用于集成湿度、压力和温度传感器, 如图 2 (b) 所示。压力传感器的悬挂柔性结构和湿度传感器的传感电极通过牺牲金属层的正面刻蚀来实现。这些环境传感器是基于相同的工艺方案设计的, 因此它们可以在同一芯片上进行制造和单片集成, 可实现更紧凑的环境传感模块的低成本批量制造。



(a) TCF、湿度、温度传感器的单片集成



(b) 湿度、压力、温度集成传感器

图 2 低成本集成环境传感器<sup>[11]</sup>

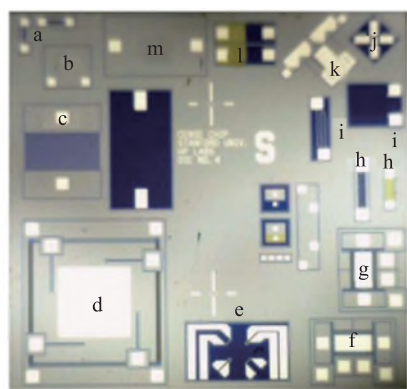
来自斯坦福大学的 ROOZEBOOM 等人<sup>[12]</sup>通过 6 个光刻掩模步骤将磁场传感器、压力传感器、光强传

感器、加速度传感器等 10 个传感器集成在了一个尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的硅基芯片上, 该环境监测多功能

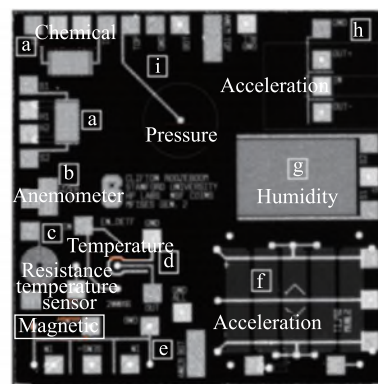


传感器芯片如图 3 (a) 所示。其中,压力传感器的灵敏度为  $15.8 \text{ mV/kPa}$ ,  $x$  和  $y$  轴的电容式加速度传感器的灵敏度为  $1.9 \text{ V/g}$ ,  $z$  轴的电容式加速度传感器的灵敏度为  $0.14 \sim 1.5 \text{ V/g}$ ,  $z$  轴的压阻式加速度传感器的灵敏度为  $70 \text{ mV/g}$ ,  $z$  轴的磁场传感器的灵敏度为  $-0.38 \text{ mV/T}$ ,  $x$  和  $y$  轴的气体流速传感器的灵敏度为  $90 \text{ mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ ,  $x$  和  $y$  轴的湿度传感器的灵敏度为  $1 \text{ pF}/\% \text{RH}$ , 基于光敏二极管的光强度传感器的灵敏度为  $2.3 \text{ mV/lx}$ , 基于光敏电阻的光强度传感器的灵敏度为  $0.3 \text{ mV/lx}$ , 带隙式温度传感器的灵敏度为

$1.9 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ , 铝材料热敏电阻温度传感器的灵敏度为  $0.72 \sim 2.9 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ , 硅材料热敏电阻温度传感器的灵敏度为  $1.4 \sim 1.5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ 。2015 年,该团队<sup>[13]</sup>将 7 种不同的传感器集成在一个绝缘体上硅 (SOI) 硅片上,该多功能集成传感器芯片如图 3 (b) 所示。该芯片的尺寸为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ , 采用晶圆级封装工艺,在低真空中将传感器与活动部件密封,然后在密封层顶部的传感器表面进行微机械加工,实现了更高密度更小型化的多传感器 SoC 集成,具有较高的实用性。



(a) 环境监测多功能传感器芯片<sup>[12]</sup>



(b) 多功能集成传感器芯片<sup>[13]</sup>

图 3 高度集成的环境传感器

在集成了多个传感器的单传感器芯片的研究中, SOI-CMOS 和深反应离子刻蚀 (DRIE) 技术极具前景。通过 CMOS 兼容工艺制造了传感结构、IC 处理、片上驱动和读出电路。采用 DRIE 技术制造了垂直的侧壁, 相比于通过各向异性刻蚀获得的倾斜侧壁, 实现了更小的芯片面积。此外, 与湿刻蚀技术相比, DRIE 技术不受硅晶格取向的限制, 可以实现圆形膜。与方形膜相比, 圆形膜在膜 / 基底边缘具有更均匀的应力分布, 进而能够提供更高的热机械稳健性。并且, DRIE 技术允许将多个传感器阵列一起放置在同一芯片上, 而不会对膜之间的隔离区造成损害。2014 年, MANSOOR 使用 SOI-CMOS 工艺和 DRIE 技术制造了能够同时检测微通道压力、温度和流量的多传感器微机电系统 (MEMS) 芯片<sup>[14]</sup>, 包含 10 个硅二极管温度传感器阵列、1 个压阻式压力传感器和 9 个微热膜流量传感器阵列。2016 年, MOHTASHIM 等制造了测量流体压力、温度和流量的 SOI-CMOS 多功能传感器<sup>[15]</sup>, 如图 4 所示。传感器由热敏二极管组成的温度传感器、压阻式压力传感器和基于热膜结构的流速传感器构成, 完成 CMOS 工艺后采用 DRIE 工艺进行加工, 将  $\text{SiO}_2$  层中嵌入的流速传感器释放, 形成热膜结构。该集成化多功能传感器中的温度传感器在驱动电流为  $0.1 \sim$

$10 \mu\text{A}$ 、测量温度为  $20 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 灵敏度为  $-1.41 \sim 1.79 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ ; 压力传感器在测量压力为  $0 \sim 75 \text{ kPa}$  时, 灵敏度为  $69 \mu\text{V}/(\text{V} \cdot \text{kPa})$ ; 当测量流速小于  $4.7 \text{ L/min}$  时, 流体传感器的灵敏度为  $17.3 \text{ mV}/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$ 。DRIE 技术减小了侧壁倾角, 使得器件可以紧密地封装在同一芯片上。SOI-CMOS 工艺使得集成系统具有更高的设备密度、更好的性能、更低的功耗、耐高温性 (最高达  $225 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 及可重复性, 从而使该多功能传感器芯片能够满足流体动力学实验的研究需求, 可广泛应用于流体实验、航空航天、汽车、生物医学和工业加工等领域。

剑桥大学的研究小组与华威大学合作, 在 SOI-CMOS-MEMS 平台技术的开发方面工作了 20 多年<sup>[16-19]</sup>。该平台基于标准 CMOS 或 SOI-CMOS 工艺, 确保与 IC 处理、片上驱动和读出电路兼容; 同时使用 DRIE 技术刻蚀形成膜, 能够集成温度、气体、湿度、压力和流量传感器, 且实现了商业化。CMOS 兼容技术使得在薄硅层内使用有源元件成为可能, 从而能大幅提高传感器的灵敏度和信噪比<sup>[20]</sup>。采用 SOI-CMOS-MEMS 技术制造的多方向热流量传感器示意截面如图 5 所示<sup>[21]</sup>, 在微型钨加热器下面集成了二极管温度传感器。将二极管温度传感器放置在基板上, 其位于膜外部, 用于环境温度参考。

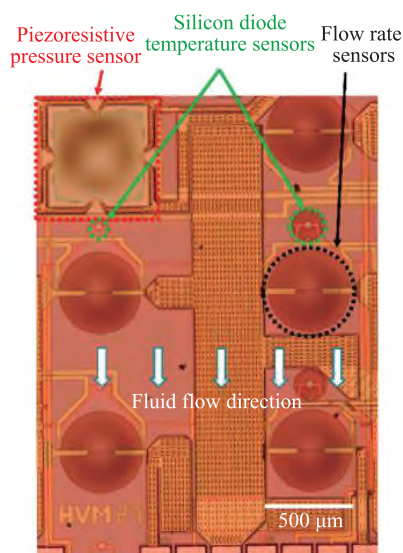
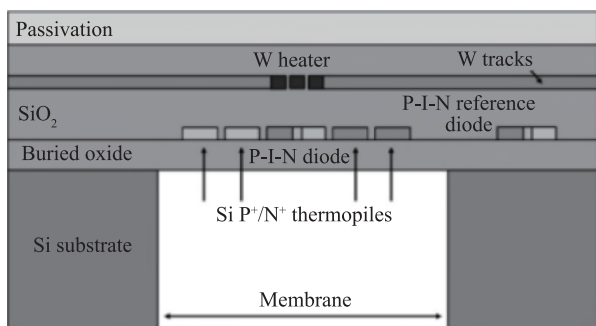
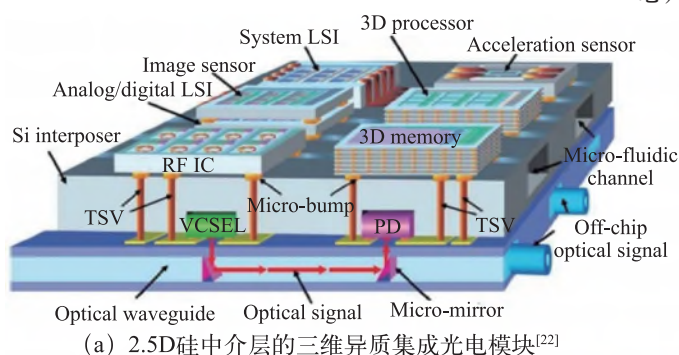
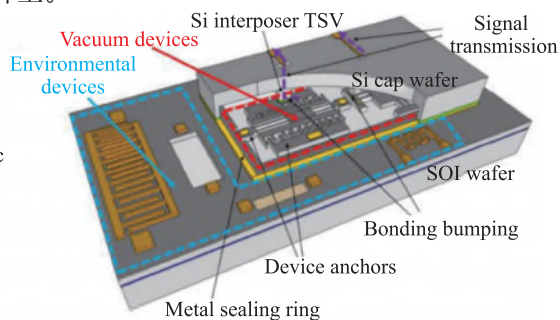
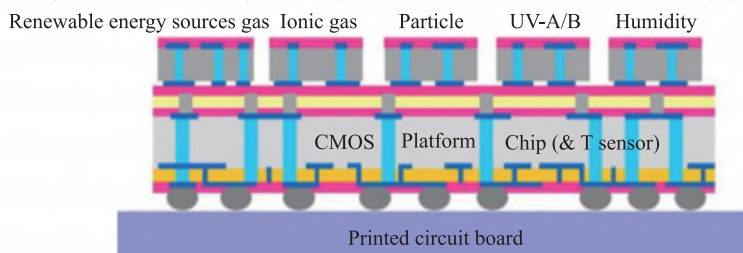
图 4 测量流体压力、温度和流量的 SOI-CMOS 传感器<sup>[15]</sup>图 5 采用 SOI-CMOS-MEMS 技术制造的多方向热流量传感器截面示意<sup>[21]</sup>(a) 2.5D硅中介层的三维异质集成光电模块<sup>[22]</sup>(b) 多个传感器的单片集成<sup>[23]</sup>(c) 用于智能建筑室内环境监测的多传感器系统<sup>[24]</sup>

图 6 TSV 技术在多传感器集成中的应用

近年来,集成系统朝着小型化、高密度方向发展,硅通孔 (TSV) 技术成为多传感器集成的热点技术。通过 TSV 互连的方式,可以把不同功能的芯片 (如射频、内存、逻辑、数字和 MEMS 等) 集成在一起,实现电子元器件的多功能化。2011 年,日本东北大学的 LEE 等<sup>[22]</sup>开发了一种适用于 CMOS、MEMS 和光电子电路的三维混合集成技术,成功实现了使用 2.5D 硅中介层的三维异质集成光电模块,如图 6 (a) 所示。堆叠在模拟数字转换芯片上的图像传感器用于高性能图像处理;加速度计 MEMS 传感器、光学传感器和射频 IC 用于对高移动速度进行高灵敏度传感。2016 年,清华大学的 MA 等<sup>[23]</sup>开发了真空辅助旋涂方法,利用无空隙的苯并环丁烯衬垫作为 TSV,通过具有 TSV 的硅中介层成功实现了电场、加速度、压力、湿度、温度传感器的三维集成,实现的多个传感器的单片集成如图 6 (b) 所示。根据传感器工作原理的差异,其中前两者采用芯片级的硅帽封装以实现真空环境,另外三者则与环境直接接触。2019 年,欧洲的 MSP (Multi Sensor Platform) 联盟开发了一个完整的三维系统集成制造链<sup>[24]</sup>,并成功设计出一套用于智能建筑室内环境监测的多传感器系统,如图 6 (c) 所示。系统包括各种气体传感器以及用于紫外光、可见光和红外光的光学传感器,采用引线键合与 TSV 技术将共计 57 个传感器设备及所需的电路三维集成在尺寸为 20 mm×20 mm 的 CMOS 平台芯片上。

## 2.2 汽车胎压传感器

除了环境传感器外,随着汽车电子市场竞争的日

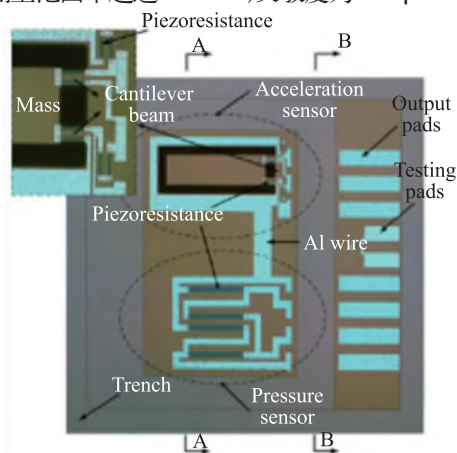
益激烈,低成本、高产量的复合胎压监测系统 (TPMS) 传感器已经成为一种趋势。为了延长电池寿命,微处



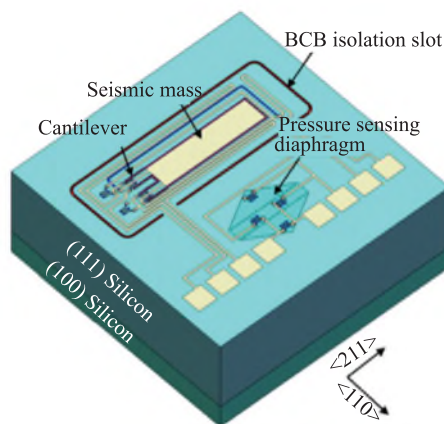
理器控制的节能工作模式需要加速计来检测车轮旋转引起的离心加速度。只有当检测到离心加速度时,压力传感器才会被唤醒以监测轮胎压力。因此,TPMS 的应用需要一个压力和加速度多功能传感器。

与在实现压力和加速度的同时进行检测的混合封装方案相比,单片集成多功能传感器的方案具有尺寸更小、成本更低、可靠性更高和制造吞吐量更高的优点。大多数压力传感器通常使用沉积的薄膜,如氮化硅膜用于形成压敏隔膜,多晶硅膜用于感测压电阻器。多晶硅的压阻灵敏度远低于单晶硅,沉积的氮化硅膜容易遭受残余应力,会严重影响传感器性能。体硅微加工或体/表面组合微加工技术通常更适合制造高性能机械传感器。2016 年,DONG 等人<sup>[25]</sup>采用一种新颖的玻璃-硅-玻璃的三明治结构,通过 MEMS 体微加工技术和阳极键合技术,在 (111) 晶面的硅片背面利用湿法各向异性刻蚀技术集成了矩形弹性膜的

加速度传感器的测量范围不超过 125 g,灵敏度为  $56 \mu\text{V/g}$ 。该三明治结构的 TPMS 传感器如图 7 (a) 所示。各向异性刻蚀的倾斜侧壁占据了较大的芯片尺寸,导致整个器件的尺寸很大。此外,由于晶片厚度和刻蚀深度的不均匀性,膜片和悬臂的背面刻蚀的厚度不均匀,从而降低了制造产量和灵敏度的均匀性。即使采用硅 DRIE 代替各向异性湿刻蚀来消除  $54.74^\circ$  的倾斜侧壁,隔膜和悬臂的厚度不均匀问题仍然无法解决。WANG 等人<sup>[26]</sup>报道了一种正面制造的 TPMS 复合传感器,其电镀高密度铜以增强质量、提高灵敏度。尽管传感器芯片的尺寸缩小到了  $1.6 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ ,但电镀铜块引起的残余应力容易导致传感器不稳定。特别是在变化的环境温度下,复杂的制造步骤不利于提高传感器产量。为了解决这些问题,LI 等开发了非 SOI 晶片中的精细背面刻蚀自停止技术<sup>[27-28]</sup>,将其用于单片 TPMS 传感器的制造,所制备的 TPMS 传感器如图 7 (b) 所示。除了具有高性能外,还具有芯片尺寸小 ( $1.0 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ )、生产率高 (90% 以上) 和制造成本低 (0.09 美元/管芯) 的优点。



(a) 三明治结构 TPMS 传感器<sup>[25]</sup>



(b) 低成本单片 TPMS 传感器<sup>[28]</sup>

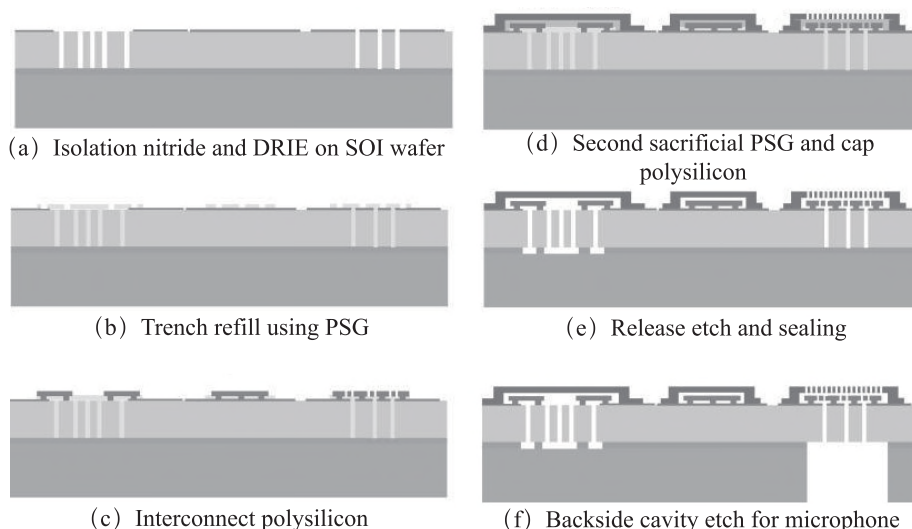
图 7 TPMS 集成传感器

由于 MEMS 传感器具有悬空和膜结构,大多数制造方法都需要结合盖子和真空密封。BANERJEE 提出了一种基于硅的多传感器单片集成方法<sup>[29]</sup>,其工艺流程如图 8 所示。该方法使用常见的结构和电气组件来实现不同的物理传感器,将三轴加速度计、绝对气压传感器和麦克风集成在同一基板上。不同传感器采用掺杂的多晶硅层形成互连,然后采用氮化硅层隔离。该方法提供了传感器套件的整体自封装,从而免除了任何真空密封盖的制造。

### 2.3 生物传感器

微制造技术的进步使微型化和新型多参数生物

传感器装置成为可能,因为其尺寸更小、成本更低、兼容性好、响应迅速,并且能够为检测分析物和物理量提供足够的灵敏度。基于电化学转导的多参数传感器平台将提供一种有前途的解决方案,以同时监测广泛的参数。MROSS 等<sup>[30]</sup>在氧化硅衬底上制造的葡萄糖和乳酸集成传感器如图 9 (a) 所示。它包含 2 个用于葡萄糖和乳酸的电流型酶传感器、一个细胞质量传感器和一个 pH 传感器。该传感器可以测量的葡萄糖的浓度为  $0 \sim 600 \text{ mmol/L}$ ,乳酸的浓度为  $0 \sim 900 \text{ mmol/L}$ 。使用这样的平台,能够连续实时原位监测测量生物过程的产物而无须物理采样。这种方法具有各种优点,如快

图 8 基于硅的多传感器单片集成的工艺流程<sup>[29]</sup>

速检测小的局部变化、调整相关参数以使系统保持在最佳状态。BÄCKER 等<sup>[31]</sup>提出了一种用于发酵过程监测的硅基多传感器芯片,集成了基于不同传感器原理的 pH、温度、电导率传感器,如图 9 (b) 所示。该芯片采用以  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  作为栅材料的电容电解质-绝缘体-半导体场效应结构实现 pH 值的测量,灵敏度约为 50 mV/pH。通过测量 2 个叉指电极之间的阻抗来实现电解质的

电导率测量。采用铂热敏电阻进行温度测量。RUSLI 等<sup>[32]</sup>将基于电流测量、电位测量和阻抗测量等检测技术的 6 个传感器集成在单个芯片上,制造的发酵过程监测传感器如图 9 (c) 所示。将其用于原位监测,即监测葡萄糖、乳酸、pH、细胞密度、溶解氧浓度和温度。葡萄糖和乳酸集成传感器的工作浓度上限为 10 mmol/L,响应时间为 20 s, pH 值传感器的灵敏度为  $(60.8 \pm 2.4)$  mV/pH。

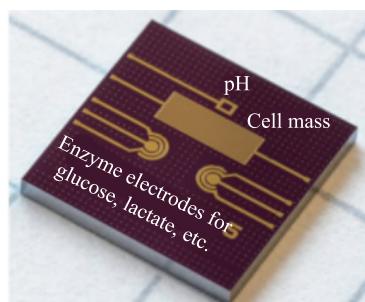
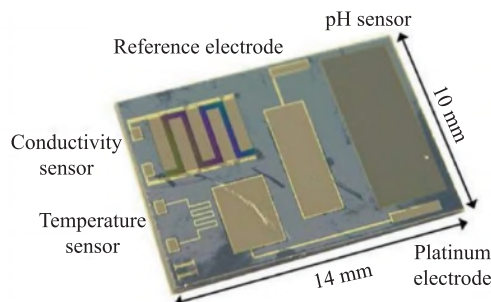
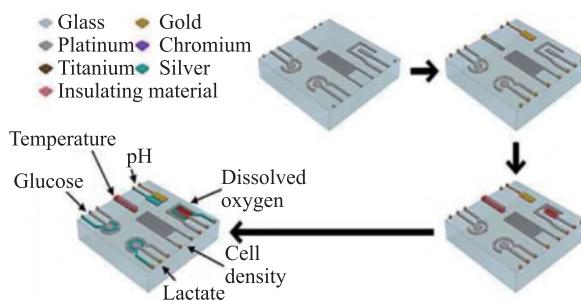
(a) 葡萄糖和乳酸集成传感器<sup>[30]</sup>(b) pH值、温度、电导率传感器<sup>[31]</sup>(c) 发酵过程监测传感器<sup>[32]</sup>

图 9 集成生物传感器

近年来,移动电子、可穿戴电子、IoT、智能电网以及其他许多领域的不断发展要求多传感器集成,以实现紧凑、低功耗和低价格的传感器系统。其中,由三轴加速度计、三轴陀螺仪和三轴磁传感器组成的组合惯

性传感器系统,作为移动和可穿戴应用中最重要和不可或缺的多传感器系统已经出现。工业界也已经大规模生产了带有气体和湿度传感器的多功能系统。这些多功能系统能够用单个封装传感器测量多个物理或

化学目标,极大地促进了需要小尺寸和多测量目标的应用市场的发展。同时,具有更多不同功能的多传感系统也正在开发中。SOI-CMOS-MEMS 技术的发展不仅使得传感器朝着小型化、低功耗和低成本方向发展,还带来了在单个芯片上集成多个传感器和电子电路的可能性。将多个独立传感器芯片封装在一个系统中是实现多传感器集成最简单的方法,但这同时牺牲了芯片的尺寸、功能和性能。多个传感器的单片集成

在尺寸、功耗、成本、性能和可靠性方面优于其他同类产品。然而,由于不同的配置、不同的传感机制、不同的制造工艺和不一致的封装方案,单片集成仍然面临不少技术挑战。综合国内外的研究现状,多功能传感器的主要研究方向是在同一芯片上制作多种功能的传感器,使其集成度变高,芯片的体积变小,工作条件趋于一致,实现多功能传感器一体化。关键的多传感器芯片如表 1 所示。

表 1 关键的多传感器芯片

序号	年份	传感器数 / 个	检测参数	基底	参考文献
1	2020	3	湿度 / 温度 / 压力	硅	[7-8]
2	2020	3	压力 / 温度 / 气体	硅	[9]
3	2022	3	温度 / 湿度 / 流速	硅	[11]
4	2013	10	磁场 / 压力 / 光强 / 加速度 / 流速 / 温度 / 湿度	硅	[12]
5	2015	7	磁场 / 压力 / 光强 / 加速度 / 流速 / 温度 / 湿度	SOI	[13]
6	2014	3	压力 / 温度 / 流量	SOI	[15]
7	2015	2	温度 / 流量	SOI	[21]
8	2011	—	图像 / 加速度	—	[22]
9	2016	5	电场 / 加速度 / 压力 / 湿度 / 温度	硅	[23]
10	2019	57	气体 / 光学	—	[24]
11	2017	2	压力 / 加速度	玻璃 + 硅	[25]
12	2022	2	压力 / 加速度	非 SOI	[28]
13	2015	2	加速度 / 气压 / 麦克风	硅	[29]
14	2015	2	葡萄糖 / 乳酸	氧化硅	[30]
15	2011	3	pH 值、电导率、温度	硅	[31]
16	2021	6	葡萄糖 / 乳酸 / pH 值 / 细胞密度 / 溶解氧浓度 / 温度	硅	[32]

### 3 多传感器集成关键技术

#### 3.1 工艺兼容设计

多传感器集成可以充分发挥其短互连、小型化和紧凑封装的优点。目前芯片界已经进行了大量的研究,要实现更加广泛的应用,需要 IC 芯片与 MEMS 芯片、电源、其他传感元件相结合。与平面集成电路组成的芯片相比,将这些采用不同工艺且结构不同的器件集成到单片系统中,存在诸多兼容性问题。

部分 MEMS 传感器可以直接在常规 IC 工艺序列中完成加工,例如温度传感器、CMOS 图像传感器、磁(霍尔)传感器、指纹传感器等,通常不需要额外的特殊工艺。但诸如加速度计、陀螺仪、麦克风等,因其内部具有三维可动的敏感结构及需要构建薄膜空腔等,无法通过常规 IC 工艺直接加工完成,需要通过 MEMS 加工工艺进行生产。其中的 MEMS 工艺传感器芯片与 IC 工艺传感器芯片和后端处理芯片在多个

方面存在明显差异。由于 MEMS 器件内含微机械结构,MEMS 芯片的尺寸通常比 IC 芯片的尺寸大。由于加工产线的差异,MEMS 晶圆的尺寸通常比 IC 晶圆的尺寸小。MEMS 晶片的厚度(200~300 μm)要比 IC 晶片的厚度(一般为 50 μm 左右或者更薄)大很多。不同于 IC 芯片的平面结构,MEMS 芯片多包含三维机械结构,如悬浮的、可移动的、易碎的结构。而且 MEMS 芯片上的 I/O 数量通常远远少于 IC 芯片上的 I/O 数量。MEMS 芯片三维集成中 TSV 的直径通常为 20~200 μm,IC 芯片三维集成中的 TSV 直径一般为 5~30 μm。多传感器集成会用到多种芯片,形成多层芯片结构,涉及多类工艺,工艺兼容性是多传感器集成中的重要工艺难点。

为了尽可能减少 IC 与 MEMS 工艺的相互影响,往往会对工艺流程进行优化。具体来说,MEMS 传感器结构和后续 CMOS 信号处理电路集成可以大致分为 3 种工艺流程:1)MEMS-First 工艺;2)MEMS-CMOS 交错工艺;3)MEMS-Last 工艺。



MEMS-First 工艺是先在衬底上制造 MEMS 相关结构,之后再进行 CMOS 的工艺制造。这种制造方式能够给 MEMS 工艺部分提供更高的热预算,因此能够使用高温工艺,从而实现高性能外延硅的制备等工艺目的,便于制造出高性能的 MEMS 器件,例如 Bosch 公司的先进多孔硅滤膜工艺<sup>[33-35]</sup>和芬兰国家技术研究中心的插塞工艺<sup>[36]</sup>。然而,制备好的 MEMS 结构会在硅片表面形成起伏,为后续 CMOS 工艺带来诸多限制,所以该工艺的推广受到较大限制。

MEMS-CMOS 交错工艺是在 CMOS 制造流程中加入 MEMS 的制造流程,通常 MEMS 部分和 CMOS 部分会被并列放置在一起。此工艺需要一条定制化的 CMOS 生产线,且 MEMS 部分与 CMOS 部分均需做出较大妥协,因此极大地限制了其推广。如英飞凌公司使用 MEMS-CMOS 方法制造集成电容式压力传感器<sup>[37-38]</sup>。在完成 CMOS 电路之前,通过湿刻蚀  $\text{SiO}_2$  释放多孔多晶硅电极膜,该方法被广泛用于汽车智能压力测量传感器的制造。

MEMS-Last 工艺是在 CMOS 工艺结束后再制造 MEMS 的相关结构。这种工艺方式的可扩展性强,产品迭代速度快,但是对于热预算和 MEMS 材料有着严格的限制,需要将先制备好的 IC 部分用钝化层保护起来,避免后续制备传感器结构时的高温工艺对电路功能造成损伤。例如,淀积 MEMS 结构层薄膜所需的高温可能会使得 PN 结过度扩散甚至击穿,也可能会使得互连金属与硅产生相互反应等。该工艺的应用产品范围广泛,如台湾清华大学团队基于 TSMC 0.18  $\mu\text{m}$  1P6M CMOS 平台和 Last-CMOS 工艺实现了压力、湿度和温度传感单元整体集成的环境传感中心<sup>[9-11]</sup>。北京大学团队基于 CMOS 兼容工艺集成加速度和压力传感单元,制作了单片集成多功能 MEMS 压阻传感器,用于在轮胎压力监控系统等应用中测量加速度和压力<sup>[39]</sup>。瑞典皇家理工学院微纳系统实验室的研究人员在基于标准 CMOS 工艺实现的读出电路上,通过转移沉积在 SOI 晶片上的 Si/SiGe 量子阱热敏电阻单元实现了单片集成的红外微测热辐射计<sup>[40]</sup>。台湾元智大学团队基于 MEMS 技术在聚酰亚胺基板上实现电压、电流、温度和微流量传感单元整体集成的多功能微传感器,并嵌入钒氧化还原流电池内以进行即时微观感测和诊断<sup>[41]</sup>。

### 3.2 封装设计

为减少外界环境对敏感结构的影响,内部芯片的封装方法与形式的设计是极其重要的一个环节,这对

减少传感器的线性误差,提高传感器的灵敏度及稳定性具有重要意义。在多传感器集成系统的封装过程中,传感器的多样性决定了需要对各个不同敏感结构的封装材料进行特性分析,包括耐温特性、抗热冲击特性和热机械相容性,此外还需要对封装结构的尺寸、质量和气密性进行特性分析,如陀螺仪、气压传感器等敏感结构需要进行真空封装。当光纤布拉格光栅 (FBG) 作为一种光纤传感器应用于一些特殊场合 (如在低温环境中进行温度测量) 时,需要对 FBG 传感器进行增敏封装<sup>[42]</sup>。热式风速风向传感器的封装结构需要保证封装内部的加热元件产生的热量能够被流体迅速地带走,同时测温电阻能快速地测量传感器表面上下游温差的变化<sup>[43]</sup>。压阻高冲击 MEMS 加速度传感器由于其应用环境的特殊性,其结构部分要求不被外界环境破坏,封装为整个传感器提供适当的阻尼以实现性能指标要求、电信号的输入输出和工艺的可实现性等。另外,封装会对传感器的响应特性产生一定的影响,因此在设计阶段也需要充分考虑到这一点。综上所述,MEMS 传感器中使用的 MEMS 加工工艺与 CMOS 电路的 IC 加工工艺存在一定的兼容性问题,多传感器集成系统的封装方法需要协同考虑各个结构的不同要求。工艺和设计复杂、产量低与大规模生产面临严重的温度限制等问题,为相关传感器器件的工艺流程设计带来更多挑战,也为多传感器集成带来了众多值得研究的问题。

## 4 多传感器集成面临的挑战

在多传感器集成系统中,每个部分的结构、工艺材料及制造过程之间的差异很大,如何考虑系统内多物理场耦合以进行传感器的协同设计,制造中如何对模块进行测试以及集成过程中的热预算问题都亟待解决。

### 4.1 多物理场耦合仿真

多传感器集成系统具有复杂的结构,各部分采用的工艺、材料不同,使得各部分的电学、力学和热学等物理学特性相差很大,系统内的多个物理场 (电磁场 / 电场、热场和电迁移静应力场) 之间存在相互耦合作用,使得建模和仿真的实现存在很大难度,同时其可靠性也是一大问题。因此,多传感器集成领域的设计方法学仍旧是当前需要重点研究的方向,如集成系统中电场、磁场、力场之间的耦合仿真计算问题,如何抑制系统内的各类耦合噪声以保证信号、电源的完整

性,兼具效率和可靠性的高速、高密度互连传输方案设计,极大地提高系统密度之后带来的功率密度增大、热管理困难等问题。目前,国内外已开展了针对这些问题的大量研究,主要包括等效电路建模及寄生参数提取、耦合噪声及抑制、工艺制造及测试方法、热应力建模及可靠性评估、电热力三场耦合计算方法及新材料应用等。

#### 4.2 测试和成品率

由于引入了较多的工艺步骤和材料,对多传感器集成电路进行测试以保证成品率和降低成本显得更加重要。多传感器集成电路结构复杂,特别是已经键合后的芯片,第一层芯片覆盖住了下面的芯片,因此其测试要比普通集成电路的测试难度更大。随着集成电路尺寸逐渐缩小到深亚微米,如何在晶圆级对高频、高晶体管数的芯片进行经济高效的探头测试,如何在测试时减薄但不损坏芯片从而提高装配良率,如何在最大限度减小测试引线盘的同时满足测试系统的要求,如何实现非接触测试方法等问题亟须解决。成品率是决定集成电路成本的重要因素。多传感器集成涉及到了很多挑战性的工艺和可靠性等问题,这导致多传感器三维集成的成品率较难控制。如何在控制面积的同时控制成品率还需要不断地探索。

#### 4.3 热预算

在多传感器集成中,不同的传感器与后处理电路各有其工艺流程,且最终需要完成三维集成。总体工艺流程的安排将会受到器件自身工艺安排的限制,导致其优化更为困难。总体工艺流程的增长也将使得热积累问题更加显著。不同的结构与材料所能承受的最大热处理温度也是有限且各不相同的。故在多传感器集成中,对总体热预算的评估和优化也将成为一个重要挑战,需要对工艺流程、工艺方法、材料、估计模型等进行进一步的研究和优化,以减少长工艺流程下热积累的影响。

### 5 结束语

根据传感器的不同配置和测量机制,国内外已经发展出了多种集成方案,这些方法各有优劣。将多个独立的传感器芯片封装到一个封装体中,是实现多传感器集成最灵活且简单的方案。该方案能将产品的开发周期大幅度缩短,但是在具体实施方案时,由于受到多芯片的限制,其集成密度相对较低,尺寸和占位面积较大,并且在 MEMS 和 IC 组件之间的电气连接

中存在较低的电磁兼容性、稳健性和较高的寄生电容等,需要在尺寸、功能和性能等方面对方案进行权衡。在单个芯片上集成多个传感器在尺寸、功耗、成本、性能和可靠性方面较优,但这种解决方案也具有复杂性较高、灵活性较低和开发时间较长的缺点。因此,由于受到不同的配置、不同的传感机制、不同的制造工艺和不一致的封装方案的影响,多传感器 SoC 集成仍然是一个技术挑战。只有小部分具有相似结构、传感机制和封装方案的传感器可以适用。

3D 集成技术的发展能够实现更多功能,使芯片结构更为紧凑,但制造工艺也更加复杂。半导体行业在 3D IC 集成和衬底通孔领域的广泛研究工作也将促进这些解决方案在集成 MEMS 和 IC 方面被广泛采用。总而言之,持续的技术发展正在推动多传感器集成朝着最终目标迈进——实现紧凑、低功耗、低成本、多功能和自主的智能系统,提高多输入传感、射频/光通信、数据处理和存储智能的性能及可靠性。

#### 参考文献:

- [1] KOH W. System in package (SiP) technology applications [C]// 2005 6th International Conference on Electronic Packaging Technology, Shenzhen, China, 2005.
- [2] TUMMALA R R, MADISETTI V K. System on chip or system on package?[J]. IEEE Design & Test of Computers, 1999, 16(2): 48-56.
- [3] YU D. TSMC packaging technologies for chiplets and 3D [J]. Proceedings of the 2021 IEEE Hot Chips, 2021: 33.
- [4] INGERLY D B, AMIN S, ARYASOMAYAJULA L, et al. Foveros: 3D integration and the use of face-to-face chip stacking for logic devices[C]// 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, CA, USA, 2019.
- [5] LAU J H. 3D IC integration and 3D IC packaging[J]. Semiconductor Advanced Packaging, 2021: 343-378.
- [6] ZHANG S Y, LI Z F, ZHOU H Z, et al. Recent prospectives and challenges of 3D heterogeneous integration[J]. E-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 2022: 100052.
- [7] CHANG C C, HONG P H, YEH S K, et al. Environmental sensing hub on single chip using double-side post-CMOS processes[C]// 2020 IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Vancouver, BC, Canada, 2020: 877-880.
- [8] LIN Y C, HONG P H, YEH S K, et al. Monolithic

- integration of pressure/humidity/temperature sensors for CMOS-MEMS environmental sensing hub with structure designs for performances enhancement[C]// 2020 IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Vancouver, BC, Canada, 2020: 54-57.
- [9] CHIEN T L, LEE Y C, CHOU T, et al. Fabrication and integration of SoC environment sensing hub with gas/pressure/temperature sensors [C]// 2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS), Shanghai, China, 2022: 138-141.
- [10] IZHAR, XU W, TAVAKKOLI H, et al. Single-chip integration of CMOS compatible MEMS temperature/humidity and highly sensitive flow sensors for human thermal comfort sensing application[C]// 2021 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), Orlando, Florida, USA, 2021: 1219-1222.
- [11] IZHAR, XU W, TAVAKKOLI H, et al. CMOS compatible MEMS multienvironmental sensor chip for human thermal comfort measurement in smart buildings [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022, 69(11): 6290-6297.
- [12] ROOZEBOOM C L, HOPCROFT M A, SMITH W S, et al. Integrated multifunctional environmental sensors[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2013, 22(3): 779-793.
- [13] ROOZEBOOM C L, HILL B E, HONG V A, et al. Multifunctional integrated sensors for multiparameter monitoring applications[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2015, 24(4): 810-821.
- [14] MANSOOR M, HANEEF I, AKHTAR S, et al. SOI CMOS multi-sensors MEMS chip for aerospace applications[C]// IEEE Sensors, Valencia, Spain, 2014: 1204-1207.
- [15] MOHTASHIM M, IBRAHEEM H, SUHAIL A, et al. An SOI CMOS-based multi-sensor MEMS chip for fluidic applications[J]. Sensors, 2016, 16(11): 1608.
- [16] UDREA F, LUCA A D. CMOS technology platform for ubiquitous microsensors[C]// 2017 International Semiconductor Conference (CAS), Sinaia, Romania, 2017: 43-52.
- [17] UDREA F, GARDNER J W, SETIADI D, et al. Design and simulations of SOI CMOS micro-hotplate gas sensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2001, 78(1): 180-190.
- [18] UDREA F, SETIADI D, GARDNER J W, et al. A novel class of smart gas sensors using CMOS micro-heaters embedded in an SOI membrane[C]// Eurosensors XIV: The 14th European Conference on Solid-State Transducers, Copenhagen, Denmark, 2000: 391-392.
- [19] UDREA F, GARDNER J W. Design of a silicon micro-sensor array device for gas analysis[J]. Microelectronics Journal, 1996, 27(6): 449-457.
- [20] LUCA A D, HANEEF I, COULL J D, et al. High-sensitivity single thermopile SOI CMOS MEMS thermal wall shear stress sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(10): 5561-5568.
- [21] LUCA A D, LONGOBARDI G, UDREA F. SOI multi-directional thermoelectric flow sensor for harsh environment applications[C]// 2015 International Semiconductor Conference (CAS), Sinaia, Romania, 2015.
- [22] LEE K W, NORIKI A, KIYOYAMA K, et al. Three-dimensional hybrid integration technology of CMOS, MEMS, and photonics circuits for optoelectronic heterogeneous integrated systems[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010, 58(3): 748-757.
- [23] MA Q, WANG Z Y, PAN L Y. Monolithic integration of multiple sensors on a single silicon chip[C]// 2016 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), Budapest, Hungary, 2016.
- [24] KÖCK A, WIMMER-TEUBENBACHER R, SOSADALUDWIKOVSKA F, et al. 3D-integrated multi-sensor demonstrator system for environmental monitoring [C]// 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXI), Berlin, Germany, 2019: 1136-1139.
- [25] DONG J, LONG Z J, JIANG H, et al. Monolithic-integrated piezoresistive MEMS accelerometer pressure sensor with glass-silicon-glass sandwich structure[J]. Microsystem Technologies, 2017, 23(5): 1563-1574.
- [26] WANG J C, XIA X Y, LI X X. Monolithic integration of pressure plus acceleration composite TPMS sensors with a single-sided micromachining technology [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2011, 21(2): 284-293.
- [27] WANG J C, LI X X. Package-friendly piezoresistive pressure sensors with on-chip integrated packaging-stress-suppressed suspension (PS3) technology[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2013, 23(4): 045027.
- [28] XUE D, WANG J C, LI X X. Monolithic integration of pressure plus z-axis acceleration composite TPMS sensors with 1.0 mm×1.0 mm chip-size and 0.09\$/die fabrication-cost[C]// 2020 IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Vancouver, Canada, 2020: 1304-1307.



- [29] BANERJEE N, BANERJEE A, HASAN N, et al. A Monolithically integrated multisensor platform[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(24): 8854-8860.
- [30] MROSS S, ZIMMERMANN T, WINKIN N, et al. Integrated multi-sensor system for parallel in-situ monitoring of cell nutrients, metabolites and cell mass in biotechnological processes[J]. Procedia Engineering, 2015, 120: 372-375.
- [31] BÄCKER M, POUYESHMAN S, SCHNITZLER T, et al. A silicon-based multi-sensor chip for monitoring of fermentation processes[J]. Physica Status Solidi (a), 2011, 208(6): 1364-1369.
- [32] RUSLI N I, VINCENTINI I P, CEYSSENS F, et al. Multi-sensor chip for monitoring key parameters in bioprocesses [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21 (18): 19675-19683.
- [33] ARTMANN H, SCHAEFER F, LAMMEL G, et al. Monocrystalline Si membranes for pressure sensors fabricated by a novel surface micromachining process using porous silicon [J]. MEMS Components and Applications for Industry, Automobiles, Aerospace, and Communication II, 2003, 4981: 65-70.
- [34] KNESE K, ARMBRUSTER S, WEBER H, et al. Novel technology for capacitive pressure sensors with monocrystalline silicon membranes[C]// 2009 IEEE 22nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Sorrento, Italy, 2009: 697-700.
- [35] LAMMEL G, ARMBRUSTER S, SCHELLING C, et al. Next generation pressure sensors in surface micromachining technology[C]// The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Seoul, Korea, 2005.
- [36] YLIMAULA M, ABERG M, KIIHAMAKI J, et al. Monolithic SOI-MEMS capacitive pressure sensor with standard bulk CMOS readout circuit[C]// ESSCIRC 2004-29th European Solid-State Circuits Conference (IEEE Cat. No. 03EX705), Estoril, Portugal, 2003: 611-614.
- [37] HIEROLD C. Intelligent CMOS sensors[C]// Proceedings IEEE Thirteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Miyazaki, Japan, 2000, 23-27: 1-6.
- [38] QU H W. CMOS MEMS fabrication technologies and devices[J]. Micromachines, 2016, 7(1): 14.
- [39] ZHANG Y X, YANG C C, MENG F R, et al. A monolithic integration multifunctional MEMS sensor based on cavity SOI wafer[J]. IEEE Sensors, 2014: 1952-1955.
- [40] NIKLAUS F, FISCHER A C. Heterogeneous 3D integration of MOEMS and ICs[J]. International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, 2016: 1-2.
- [41] LEE C Y, CHEN C H, HSIEH C L, et al. Flexible, multifunctional micro-sensor applied to internal measurement and diagnosis of vanadium flow battery[J]. Micromachines, 2022, 13(8): 1193.
- [42] LUPI C, FELLI F, LPOPOLITI L, et al. Metal coating for enhancing the sensitivity of fiber Bragg grating sensors at cryogenic temperature[J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14(6): 71-76.
- [43] DONG Z Q, CHEN J J, QIN Y K, et al. Fabrication of a micromachined two-dimensional wind sensor by Au-Au wafer bonding technology[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(2): 467-475.



#### 作者简介:

吕佩珏 (1999—), 女, 云南普洱人, 硕士, 工程师, 主要从事电子封装技术研究。