



北京大學

软件与微电子学院  
集成电路与智能系统系

《集成电路前沿技术导论》

课程报告

报告题目: MEMS 传感器工艺技术研究报告

姓 名: 胡成成

学 号: 2101210578

日 期: 2021 年 12 月 10 日

---

# MEMS 传感器工艺技术研究报告

## 摘要

随着 5G 与物联网等领域的迅速发展，MEMS 技术成为当下热门。本次研究报告针对 MEMS 技术的优势特点，应用场景不断扩大的研究背景和研究意义出发；针对 MEMS 工艺技术和现状进行调研学习，MEMS 工艺技术的关键分三个大层次：设计与仿真技术、微细加工制备技术、测试与封装技术。并对 MEMS 技术面临的挑战和我国 MEMS 技术的困境和发展机遇进行了调查分析。得出结论：需要把握物联网与 5G 技术融合的特点、新材料和新组合的机遇以及政府扶持的机会来解决我国现今的 MEMS 困境。

## 引言

随着智能制造和物联网的快速发展，传感器作为数据采集的入口，其关键器件的作用越来越重要。万物互联时代必将使智能终端大规模推广应用，传感器的市场需求也会随之急剧增加，并且主要应用类别逐渐向具有高技术含量的 MEMS 传感器领域转移。

MEMS 是基于集成电路、微电子及微细加工等技术且紧密交叉的现代信息技术前沿研究领域。MEMS 器件因其内部单元为纳米级别且结构复杂，尺寸控制及其严格，所以对制备技术及加工工艺要求极高。MEMS 传感器核心关键技术在设计及其制备加工环节，结合了半导体制备技术和机械微细加工工艺的微型器件，制造技术以及工艺难度比半导体芯片制备更难。MEMS 技术路径主要由仿真设计、加工制造、集成封装、测试分析 4 部分构成。具体的关键技术包括 MEMS 设计及仿真技术、微细加工制备技术、封装及测试技术。

## 研究背景

微机电系统（MEMS）是利用集成电路（IC）兼容的加工技术开发的集成微器件或与电气和机械部件相关的系统，其尺寸范围从微米到毫米。这些系统能够在微观尺度上感知、控制和驱动，并单独或以阵列方式运行/操作，以在宏观尺度

上产生影响。从 1970 年中期开始，MEMS（微机电系统）已成为一项创新技术，它在物理、化学和生物传感器和制动器应用领域开辟了新的领域。尽管 MEMS 技术源于 IC 制造技术，但这两种技术的测试方法却存在显著差异。这是因为 MEMS 设备对电和非电（物理、化学、生物和光学）刺激都有响应。

随着人们生活应用的不断拓展，要求能够监测多种物理参量功能的传感器需求也变的非常普遍，传感器未来发展趋势是朝着多功能、集成化、模块化方向发展，目前具有多种传感功能集成的 MEMS 器件也出现在应用市场。MEMS 设备成为未来技术的需求：喷墨打印机，使用压电或热气泡喷射将墨水沉积在纸张上；现代汽车中的加速计有很多用途，包括碰撞中的安全气囊展开；消费电子设备中的加速计，如游戏控制器、个人媒体播放器/手机和许多数码相机；在 PC 中，当检测到自由下落时，将硬盘头停驻，以防止损坏和数据丢失；现代汽车和其他应用中用于检测偏航的 MEMS 陀螺仪，例如展开防滚翻杆或触发动态稳定性控制；硅压力传感器，例如汽车轮胎压力传感器和一次性血压传感器；显示，例如基于 DLP 技术的投影仪中的 DMD 芯片表面有几十万个微镜；光交换技术，用于数据通信的交换技术和校准；干涉式调制器显示器（IMOD）在消费电子产品中的应用（主要用于移动设备的显示器）；由于 RFMEMS 技术的出现，改善了电感器和电容器的性能。

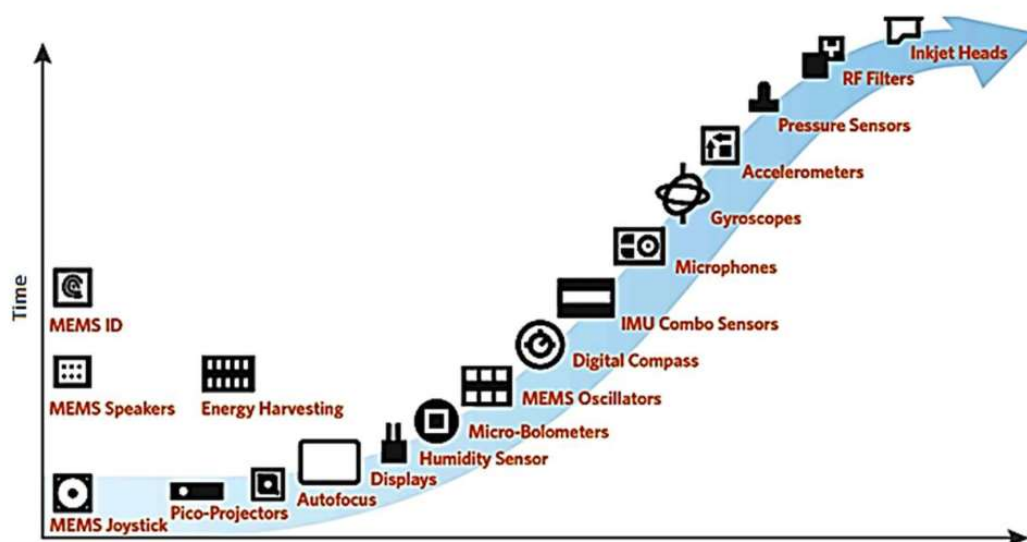


图 1 基于产品的 MEMS 应用增长曲线<sup>[7]</sup>

MEMS 基本结构分为传感器、执行器、信号处理单元以及通讯接口单元。

MEMS 传感器以半导体制造技术为基础，将微电子技术和微机械加工技术相结合，采用氧化、光刻、扩散、外延等半导体制备技术，结合硅料腐蚀、固相键合、微细加工、LIGA 等工艺，应用以上技术工艺制备三维微型单元并与特定用途的薄膜材料、控制电路相结合，实现对压力、重力、磁场、光强、温度、湿度、声量、流量、热量、浓度等各类物理或化学参数的探测。

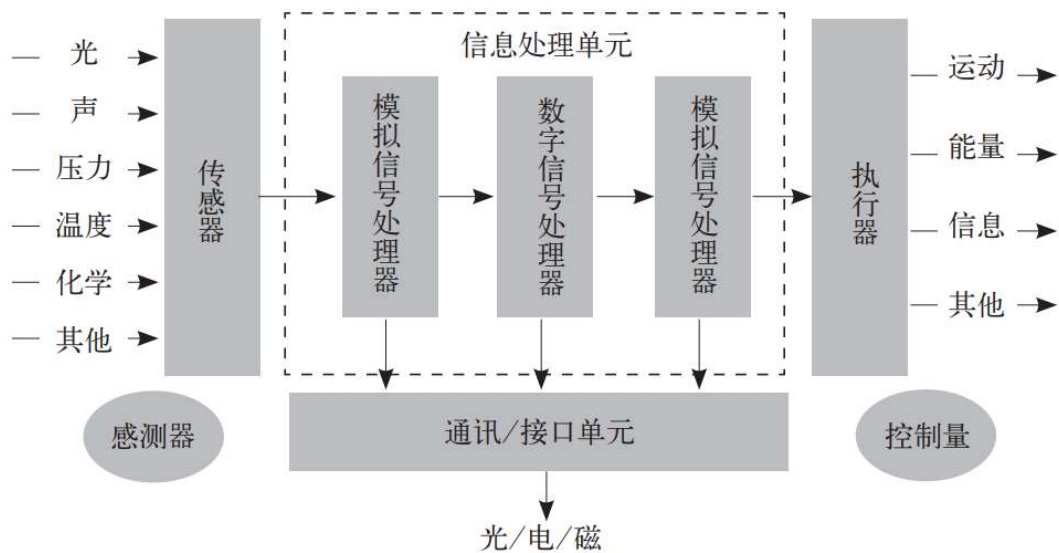


图 2 MEMS 系统基本构成<sup>[1]</sup>

## 研究意义

汽车、生物医学、IC、MEMS、传感器是 MEMS 技术易于采用的各种潜在领域。MEMS 组件的开发和制造成本不可低估，但该技术有许多可能为人类带来独特的好处。MEMS 带来的优势主要体现在以下三个方面：1) 现有设备的小型化。2) 使用在更大范围内不起作用的物理原理。3) 在微观世界中开发操作工具。这三点 MEMS 的优势充分体现了让应用设备微型化，把研究带到微观世界的优势，从而给人们的日常生活带来便利。

其中，研究其加工工艺的关键技术是 MEMS 技术落地普及的基础，MEMS 设计及仿真技术涉及内容广、技术要求高、综合性强。MEMS 微细加工制备技术是工艺技术的核心。MEMS 测试与封装技术是器件成型的最后门槛，决定着工艺成型结果。因此，研究 MEMS 工艺的关键技术是确保 MEMS 制造的保障。

---

## MEMS 工艺技术与现状

### MEMS 设计及仿真技术

MEMS 设计及仿真技术需要根据 MEMS 器件的功能原理作为设计指导，通过计算机的模拟仿真进行验证分析并迭代优化。MEMS 顶层设计涵盖后续的机械加工、封装集成以及测试分析等各环节，对器件的功能参数起着决定性的影响。与微细加工制备技术相比，MEMS 器件设计及仿真技术要求更高。目前 MEMS 器件设计及仿真技术的是朝着自动化、智能化的趋势发展，不断提升产品的功能集成度以及实用性，满足多元化的市场需求。

MEMS 传感器系统设计关键点主要体现在信号与能量之间的转换。MEMS 系统设计仿真分析方法主要包括有限元法（FEM）、边界元法（BEM）、有限差分法（FDM）等。MEMS 设计可分为工艺级、器件级、系统级等不同的层次，其设计难度依次递增。

MEMS 传感器设计首先对功能需求、性能特性以及加工要求进行综合分析，构建系统基本框架结构，梳理系统设计基本方向；然后根据系统基本框架结构进行功能模块以及单元结构的布局，再利用信号评测电路对电子线路和机械结构布局进行整体性优化改进，从而形成完整结构布局。在 MEMS 系统设计中从顶层开始结构设计及布局，在系统结构模型构建过程中对各功能结构进行分工，同时关注各系统之间的信息反馈，如果发现系统结构间存在问题及时进行调整。

### MEMS 微细加工制备技术

MEMS 传感器通常采用微缩比例的孔道、腔体、悬臂等机械零部件常用结构。MEMS 器件加工技术与半导体制造工艺类似，均采用批量处理模式的微细加工制造技术工艺，其特点是能大幅减少规模化生产成本。MEMS 制备技术工艺主要包括体微加工、表面微加工和 LIGA 工艺(三维微细加工工艺)，体微加工、表面微加工 2 类制备加工技术工艺都是基于集成电路制备技术，所使用的基本材料为硅材料。

体微加工技术是在硅衬底上通过各向异性刻蚀制备各种微型机械构件。该技术采用对硅材料的腐蚀得到小深宽比且外形结构简单的微细。机械结构零件，技术优点是资金投入少、加工设备简单，可以将大尺寸硅片批量制备成高精度

---

MEMS 器件，同时该技术还可以去除因为研磨制备工艺造成的剩余机械应力，降低了器件的不良率，提升了器件性能的可靠性和稳定性。

表面微加工技术是通过表面生长及光刻等工艺在基底逐层构造各种微细机械部件。该技术可以通过掺入各种材料制备结构比较复杂的器件，一般采用的淀积技术分为化学工艺和物理工艺 2 大类，化学工艺包括有化学气相沉积、电镀；物理工艺包括物理气相淀积、蒸发；刻蚀技术采用干法刻蚀和湿法腐蚀等工艺。表面微加工技术的缺点是技术工艺复杂，加工设备价格高昂。

LIGA 技术是制版、电铸、注塑的德文缩写，是一种基于 X 射线光刻技术的三维微细加工工艺技术。与传统微细加工方法相比，采用 LIGA 技术可批量制备大深宽比、结构复杂的 MEMS 器件，同时对加工材料的范围也比较广，可对金属、陶瓷、塑料、聚合物等材料进行加工。其工艺流程为辐射、显影、电铸、剥模、充模、脱模、电铸成型等步骤，在批量制备器件时充模、脱模、电铸成型等工艺步骤可重复进行。

## MEMS 测试与封装技术

MEMS 传感器的功能原理以及器件结构差异性很大，同时封装形式的多样性以及技术复杂，导致部分 MEMS 器件的封装以及测试成本占比极高。MEMS 传感器技术中，器件封装及系统测试也是关键环节之一。其封装方法以及系统测试分析决定着 MEMS 传感器的功能稳定性和可靠性。其中，MEMS 产品的晶圆级测试在早期产品功能测试、可靠性分析及失效分析中，可以降低产品成本和加速上市时间，对于微机电系统产业化非常关键。

晶圆级测试技术应用于 MEMS 产品开发全周期的 3 个阶段：1) 产品研发 (R&D) 阶段：用以验证器件工作和生产的可行性，获得早期器件特征。2) 产品试量产阶段：验证器件以较高成品率量产的能力。3) 量产阶段：最大化吞吐量和降低成本。

MEMS 器件封装技术可分为倒装封装、单片集成封装以及多芯片封装等。MEMS 传感器采用专用电子电路集成芯片进行采样及驱动，倒装封装技术是将 IC 芯片正面倒置朝下并与基板封装，其优势是可从芯片四周引出接口与其他电子线路连接，提升了器件的运行速度，其封装结构更轻薄、体积更小巧、信号传输更高效。单片集成封装是指在基底上形成微型结构以及线路，使其构成完整系统，

---

其具有内部互连长度短、电气特性优异、结构小、接口接点密度高等优点，是 MEMS 器件封装较理想方式；多芯片组件封装是指封装器件中包含 2 个及其以上芯片通过基板联接构成的封装形式，该组件封装结构属于系统级封装，包含器件所需的信号接口、散热控制、机械支撑等功能。多芯片封装技术是 MEMS 器件封装的发展趋势，其具有线路密度高、尺寸结构小、工作频率高、运行效率优、制备成本低等特点。

## **MEMS 技术挑战与解决方案**

### **MEMS 面临的技术挑战**

MEME 器件产业技术门槛高，工艺流程复杂。封装、测试和制造方法都由 MEMS 器件的应用所决定，器件的分辨率越高，意味着具有更多互连的大尺寸芯片。由于许多原因，具有大像素阵列的芯片存在一定的挑战性。常见的封装问题，例如机械应力和隔热，变得更加难以处理。此外，芯片本身的成本也会很高，使得装配良率变得更加重要。对于一款标准的 MEMS 器件，为了接入高腐蚀和严苛介质的环境，目前通常用不锈钢隔膜保护 MEMS，然后在两者之间注油。这种方案成本高且耗时，需要额外的机械加工部件，而且注油成本很昂贵，并且实际上会削弱 MEMS 芯片的精度和可重复性。

无论从硬件组成还是从测试技术和验证手段比较，目前我们与国际还有一定的差距，主要体现在 3 个方面：

1) 缺乏标准化测试硬件系统。尽管早期测试有诸多好处，但对大部分制造商来说很难找到标准化、独立运行的测试系统，且尚无同一的测试标准可依循。MEMS 测试必须通过添加适当的模块进行非电激励输入测量和非电信号输出检测，晶圆探针可以被扩展成一个开放的、通用的测试平台，根据测试需要可以方便地调整。整个开放平台可以用于测试不同的产品如：压力传感器、微麦克风和微镜等。

2) 测试技术有待提高。在激励信号方面，除了电激励和电测试之外，器件可能还需要进行声学、发光、振动、流体、压力、温度、化学或动力激励输入；在测试平台方面，器件可能需要开放的平台且在受控的环境中测试才能保护器件不受环境的损伤或正确地在封装的环境内激励器件。MEMS 器件的晶圆级测试可

---

以在测试所需的真空中或在特殊的气体环境中操作，需要精确可控的测试环境。

3) 系统验证手段空白。目前国内的测试系统鉴于晶圆级测试的微观性和用于探针末端的标准样片的缺乏，无法从准确度方面对其进行量值传递，从而难以保证其溯源性，无法发挥晶圆级测试的优越性，难以保障剔除芯片的合理性和准确性。

新一代 MEMS 传感器的开发成本正在增加，这导致了几次重大转变。为了补偿不断上升的开发成本并降低风险，MEMS 传感器供应商正在寻求更广阔、更多样化的市场，而不仅仅是针对大批量应用。同时，终端设备制造商要求更大的产品差异化，但他们不想为此付出高价，也不想等待新的硬件迭代。为了保持竞争力，传感器供应商提供了支持新功能的软件解决方案。这种方法更具成本效益，并加快了设计到生产的周期。

## 国产 MEMS 的四大困境

1) 困境一：研发时间长，难以投产。MEMS 技术研发投入时间过长是阻碍国产 MEMS 发展的第一道难关。目前国内的教育体制很难在短时间内批量培养出相关技术人才，带来的结果是研发周期拉长，一款 MEMS 产品至少需要 6-8 年的研发时间，然后才能进入测试阶段。

2) 困境二：科研成果商品化难，无处流片难上难 MEMS 采用半导体工艺和材料，以半导体制造技术为基础而进阶发展而来，因此其设计和生产的过程与芯片制造类似，同样需要光刻、薄膜沉积、掺杂、刻蚀、化学机械抛光工艺等，也就是要完成 IC 设计的研发、设计、制作、封装等过程，只是在微结构方面需要采用微加工技术制造，比如体硅微加工技术、表面微加工技术和特殊微加工技术等。MEMS 芯片的制作流程同样是拿到设计先流片，再大批量生产。目前，MEMS 设计并没有成熟的 EDA 工具可以做仿真，只能以 DOE（试验设计）的形式先到晶圆厂投片，拿到样品后进行测试，根据测试结果再次修正，然后再去投片，如此反复直到测试成功。繁琐而复杂的制作过程大大地延长了 MEMS 的产品化周期，并且，如果找不到合适的产线进行流片，那一切都只是“纸上谈兵”。

3) 困境三：产能低，良率不佳。MEMS 器件的生产和制造依赖各种工艺和许多变量，而且一种 MEMS 产品品类只能对应一种工艺，典型的一个萝卜一个坑。因而，制造 MEMS 器件不仅需要成熟且丰富的工艺技术，还要有足够多的



---

产线保证产能。

4) 困境四：下游企业不认可，资本力量不重视下游企业的市场策略和资本的忽视也挫伤了国产 MEMS 企业的积极性。很多中小型 MEMS 企业在市场开拓过程中经常遇到过这种情况，大部分贸易商都仅经销国外产品，不愿接受国内的新产品，更不要说主动开发国内市场，再加上下游的终端企业对“国产”产品不信任，整个国内 MEMS 产业链不流通，导致的结果是国产 MEMS 产品一直无法突围市场经验缺失、无法满足客户需求的滞后回路。

## 国产 MEMS 的三大发展机遇

1) 各领域需求剧增，市场空间大。伴随着新能源车的需求增长，物联网和 5G 通信的进一步结合，工业和医疗领域的电子渗透率增加，都为国产 MEMS 提供了施展拳脚的空间。

2) 新材料、新组合带来发展机遇新材料或将成为国产 MEMS 发展的新机会。截止到目前，硅基 MEMS 发展已经有 40 多年的发展历程，如何提高产品性能、降低成本是全球企业都在思考的问题，而基于新材料的 MEMS 器件则成为摆在眼前的大奶酪，PZT、氮化铝、氧化钒等新材料 MEMS 器件的研究正在进行中，抢先一步投入应用，将是国产 MEMS 弯道超车的最佳时机。另外，将多种单一功能传感器组合成多功能合一的传感器模组，再进行集成一体化，也是 MEMS 产业新机会。提高自主创新意识，加强创新能力，当第一也不是那么的遥远。

3) 政府扶持、“产学研”结合、资金加持三件套。MEMS 产业的发展从未离开过国家视线，从 16 年国务院出台《“十三五”国家科技创新规划》开始，到 19 年工信部发布《关于促进制造业产品和服务质量提升的实施意见》，国家对于 MEMS 产业的扶持力度进一步增强。

## 针对 MEMS 工艺技术的思考与见解

MEMS 制备技术工艺特点是一类器件产品对应着一种制备生产工艺。不同的 MEMS 传感器之间没有标准工艺流程，产品技术指标较多，每类传感器实现批量生产都需要从前端开始研发投入，工艺研发时间长且成品率比传统半导体器件行业更低。我想，这也是 MEMS 面临的最大问题。MEMS 工艺技术作为前沿的高技术，其各项指标和技术难度使得 MEMS 传感器产业发展需要在材料、设

---

计、工艺、设备等产业链各环节进行持续长期的高投入。从一些新闻消息上可以看出，全球主要发达国家都把 MEMS 传感器产业列为国家发展战略，我国政府同样对 MEMS 传感器产业高度重视，将其作为战略性新兴产业重点发展。但是，目前我国在 MEMS 传感器领域存在产业链上游的设计、工艺、材料等环节技术薄弱，在系统应用及配套解决方案提供服务不到位，以及 MEMS 产业资源分布不均等问题。但是，这不是限制我们发展的理由，随着科研人员的不懈努力，我想很快随着工艺技术的不断突破，我国的 MEMS 工艺技术也会与国际水平不断逼近。如今的硅基加工工艺也许随着材料学科的研究突破，新的物质和材料能够作为更高效的基础刻蚀物质。微型化、批量、集成化的 MEMS 技术研究道阻且长。

## 总结与展望

本次研究报告针对 MEMS 技术的优势特点，应用场景不断扩大的研究背景和研究意义出发。针对 MEMS 工艺技术和现状进行调研学习，MEMS 工艺技术的关键分三个大层次：设计与仿真技术、微细加工制备技术、测试与封装技术。并对 MEMS 技术面临的挑战和我国 MEMS 技术的困境和发展机遇进行了调查分析。得出结论：需要把握物联网与 5G 技术融合的特点、新材料和新组合的机遇以及政府扶持的机会来解决我国现今的 MEMS 困境。

今后 5 年是我国 MEMS 传感器产业快速发展的关键时期，我国传感器产业布局主要包括长三角、珠三角、京津冀地区和东北 3 省等区域。MEMS 产业发展比较好的地区正在逐步形成产业集聚效应，已经初步构建了比较完备的 MEMS 器件产业体系和科研创新机制，突破了一批核心关键技术，为 MEMS 器件产业化奠定了技术基础。未来可依托具有优势的产业集聚区，由企业和科研院所组成产学研用相结合的立体化发展模式，完善产业投融资环境和技术成果转化机制，突出产业要素集聚优势，打造产品品牌效应，合理调整产业结构以及健全 MEMS 产业链，形成技术自主创新能力强、产业链配套齐备的传感器产业基地，引导推动 MEMS 传感器产业快速健康发展。相信，在不久的将来，我国 MEMS 研究人员在各项技术上出现突破性进展，推动我国的 MEMS 工艺技术走上国际前列！

---

## 参考文献

- [1]. 刘洋.微机电系统发展现状及关键技术分析[J].新材料产业,2019(03):51-55.
- [2]. 乔玉娥,刘岩,程晓辉,丁立强,丁晨,梁法国.MEMS 晶圆级测试系统现状及未来展望[J].传感器与微系统,2016,35(10):1-3+7.
- [3]. 李胜利,马占锋,高健飞,王春水,黄立.MEMS 晶圆级封装种子层刻蚀工艺研究[J].电子与封装,2021,21(11):8-11.
- [4]. Errando-Herranz C, Takabayashi A Y, Edinger P, et al. MEMS for photonic integrated circuits[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 26(2): 1-16.
- [5]. Ejeian F, Azadi S, Razmjou A, et al. Design and applications of MEMS flow sensors: A review[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 295: 483-502.
- [6]. Wang D, Watkins C, Xie H. MEMS mirrors for LiDAR: A review[J]. Micromachines, 2020, 11(5): 456.
- [7]. Mishra M K, Dubey V, Mishra P M, et al. MEMS technology: a review[J]. Journal of Engineering Research and Reports, 2019: 1-24.
- [8]. Ali W R, Prasad M. Piezoelectric MEMS based acoustic sensors: A review[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 301: 111756.
- [9]. 徐景辉. MEMS 工艺集成化设计与仿真技术研究[D].西北工业大学,2006.