



哈尔滨工程大学
HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY

现代传感器原理及应用

第七章 MEMS 传感器

智能科学与工程学院



MEMS传感器

MEMS传感器

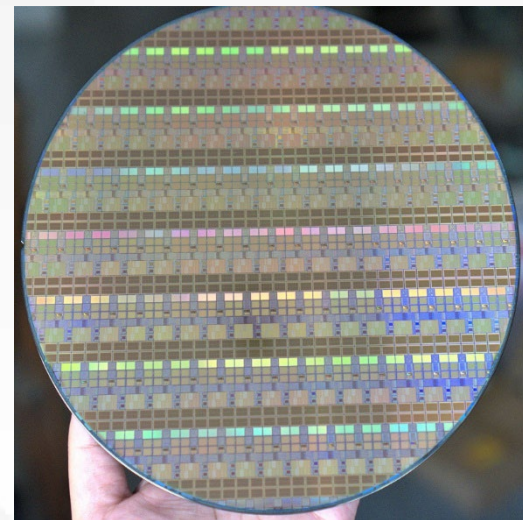
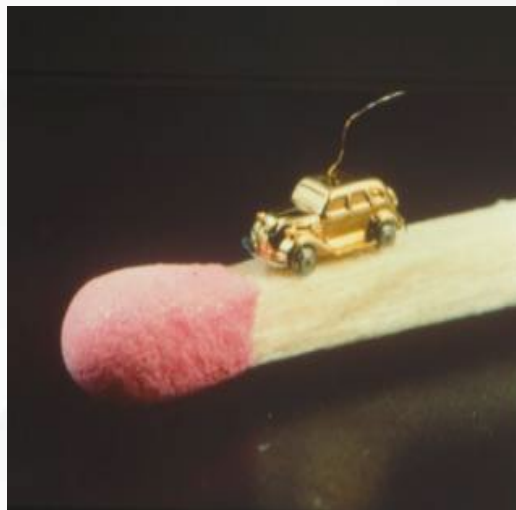
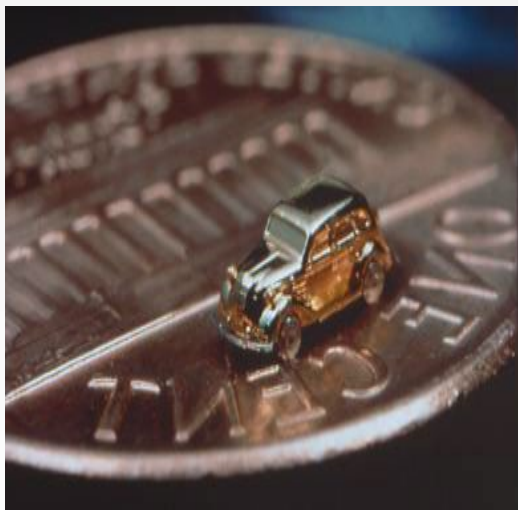
概念，工作原理

压力传感器工作原理、功能结构、技术特点、标定方法、气压传感器与海水深度传感器复杂环境适应性。

MEMS发展方向

MEMS的基本概念

- 美国：MEMS—MicroElectroMechanical System
- 欧洲：Micro System
- 日本：Micro Machine



MEMS的全称是微型电子机械系统（Micro-ElectroMechanicalSystem），微机电系统是指可批量制作的，将微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理和控制电路、直至接口、通信和电源等于一体的微型器件或系统。



传感器种类繁多，常见的有温度、压力、湿度、声学、视觉、液体等等传感器，相关数据显示，全球产品化的传感器种类超过2.6万余种，涉及物理、化学、生物等等众多检测方式。

微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)

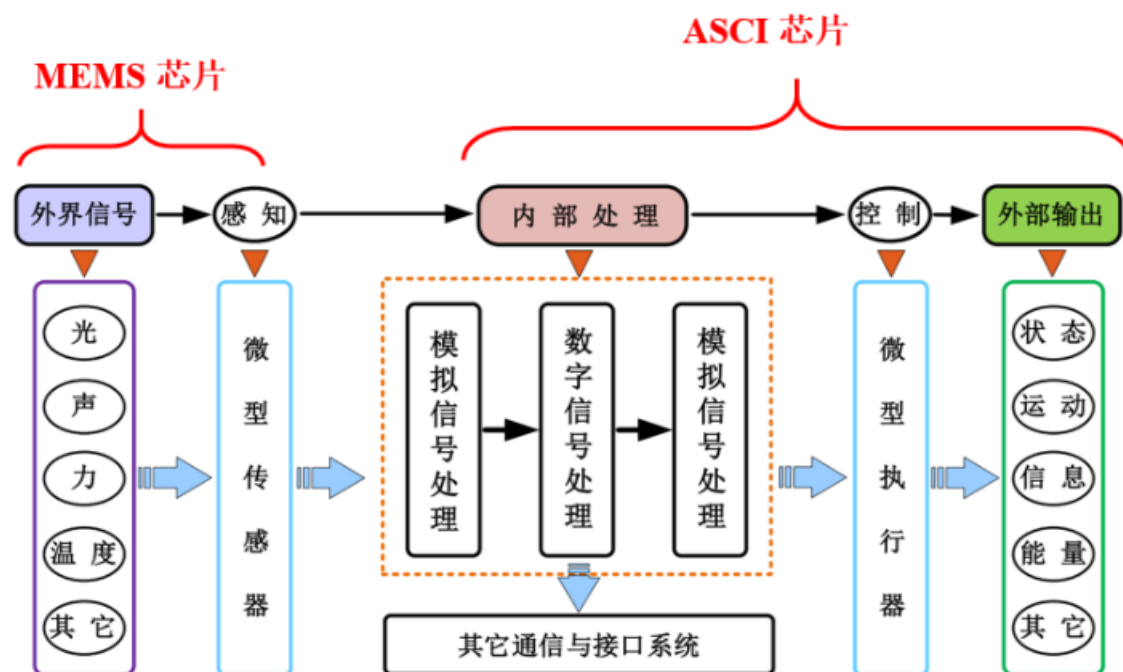
组成:

主要由微型传感器、信号处理单元、电控系统、微型执行器等组成。

原理:

通过自身机械结构将光、电、磁、振动等物理信号被微型传感器感知捕获后，传入到内部的信号处理单元对其进行分析和处理，最后通过微型执行器与外界进行交互，完成特定功能的输出。

应用范围: 航空航天、医疗机械、智能家居、智能网联汽车等领域。



MEMS 的组成结构图

MEMS声学传感器典型产品构造示意图

软胶封装

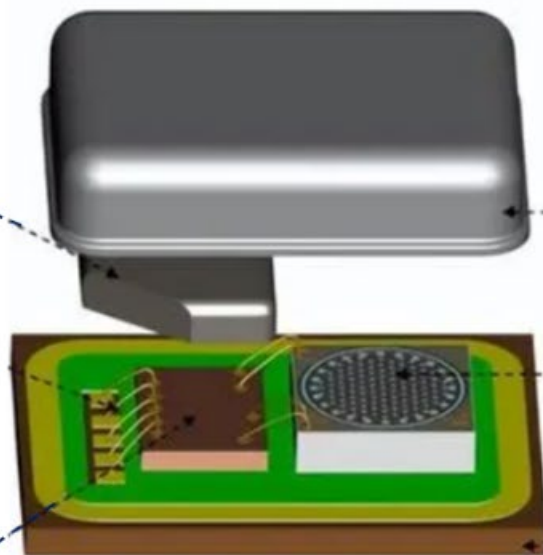
保护金线、ASIC芯片、
外壳降低光噪影响

金线

提供电路连接

ASIC芯片(核心)

通过电路原件将电容、
电阻等信号
变化转化为电信号



外壳

保护各组件+电磁屏蔽

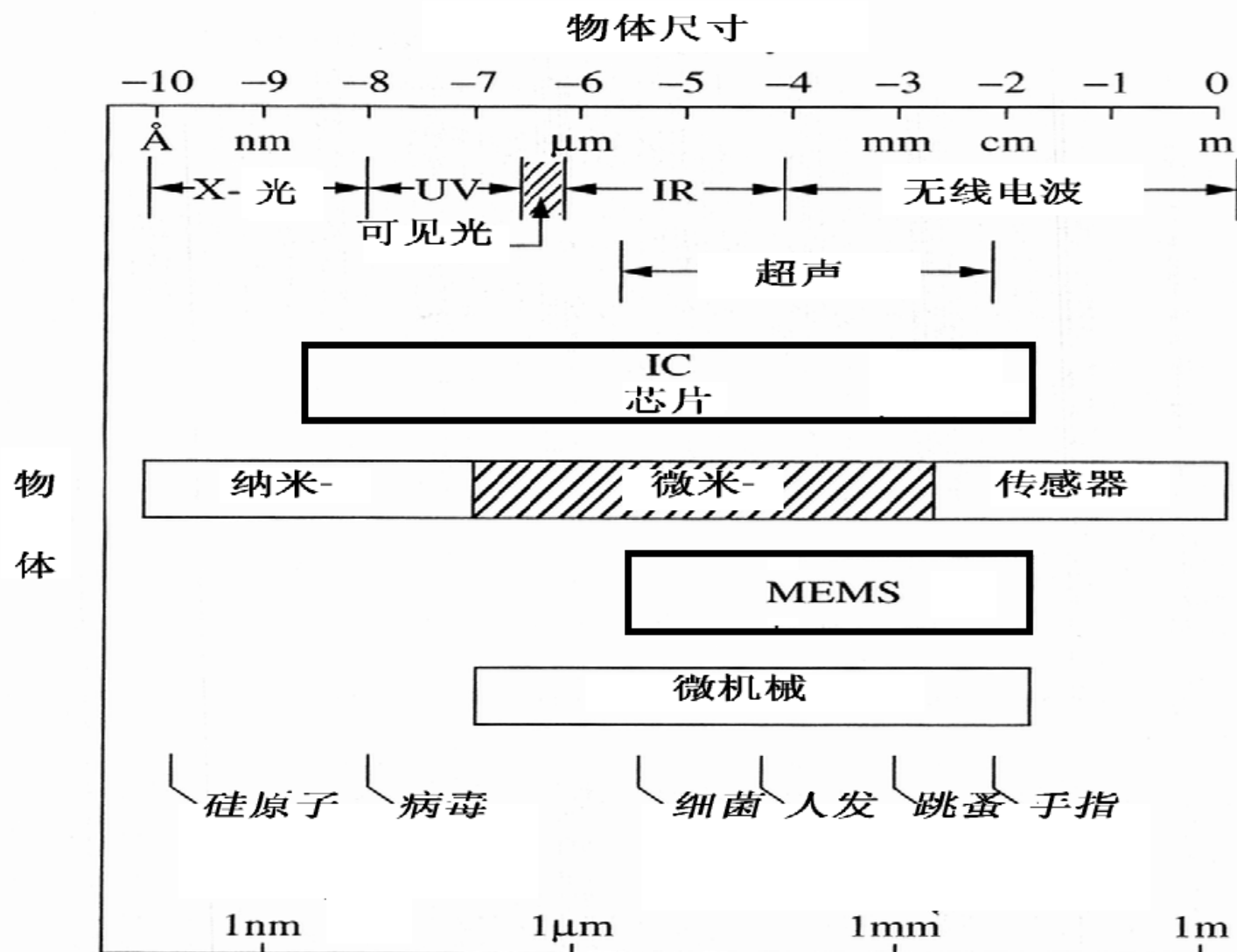
MEMS芯片(核心)

通过物理结构将声音转化为电容、
电阻等信号

基板

承载其他部件

MEMS尺寸与日常生活中物体的比较



MEMS 传感器

MEMS 物理传感器

- MEMS 力学传感器:** 加速计、陀螺仪、惯性测量组合、压力、流量、位移
- MEMS 电学传感器:** 电场传感器、电场强度传感器、电流传感器
- MEMS 磁学传感器:** 磁通传感器、磁场强度传感器
- MEMS 热学传感器:** 温度传感器、热流量传感器、热导率传感器
- MEMS 光学传感器:** 红外传感器、可见光传感器、激光传感器
- MEMS 声学传感器:** 噪声传感器、声表面波（麦克风）、超声波传感器

MEMS 化学传感器

- MEMS 气体传感器:** 可燃气体传感器、毒性气体传感器、大气污染气体
- MEMS 湿度传感器**
- MEMS 离子传感器:** pH传感器、离子浓度传感器

MEMS 生物传感器

- MEMS 生理量传感器:** 触觉传感器、生物浓度传感器
- MEMS 生化量传感器**

MEMS传感器即微机电系统(Microelectro Mechanical Systems), 是在微电子技术基础上发展起来的多学科交叉的前沿研究领域, 涉及电子、机械、材料、物理学、化学、生物学、医学等多种学科与技术。

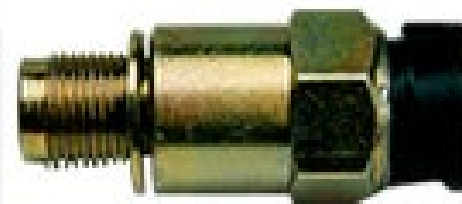
MEMS传感器是采用微电子和微机械加工技术制造出来的新型传感器。与传统的传感器相比, 它具有体积小、重量轻、成本低、功耗低、可靠性高、适于批量化生产、易于集成和实现智能化的特点。在微米量级的特征尺寸使得它可以完成某些传统机械传感器所不能实现的功能。



压力传感器



流量传感器



加速度传感器

MEMS 执行器

MEMS 光学：DMD（数字微镜器件）、自动聚焦、光具座

MEMS 射频：谐振器、滤波器、低噪声放大器、功率放大器、射频开关、定时器

MEMS 微流控：喷墨打印头、生物芯片

MEMS 微结构：微针、探针、手表原件

应用：

MEMS 执行器是在动力源的驱动下完成需要动作的微机械系统，包括微喷墨头、MEMS 滤波器、EMS 扬声器、MEMS 微镜、MEMS 微射流执行器、MEMS 投影机等。

执行方式：

MEMS 执行器的执行方式有压电执行、电磁执行、静电执行、热执行等，核心功能是将其他能量转为机械能。

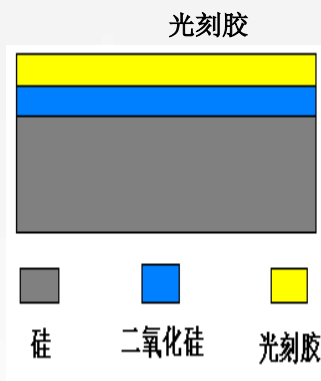
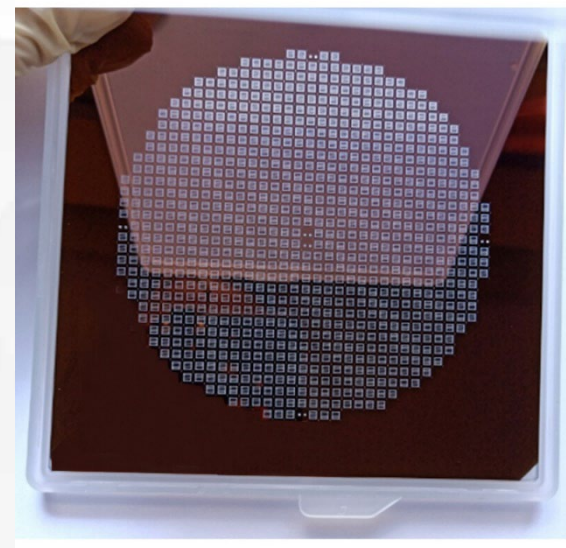
MEMS传感器制造工艺

- 光刻工艺
- 表面微细加工工艺
- 薄膜工艺
- 表面牺牲层工艺
- 体硅腐蚀工艺
- 深槽技术
- 键合工艺

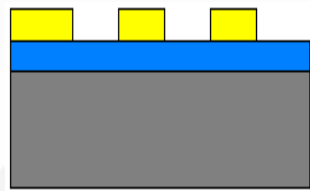


光刻工艺

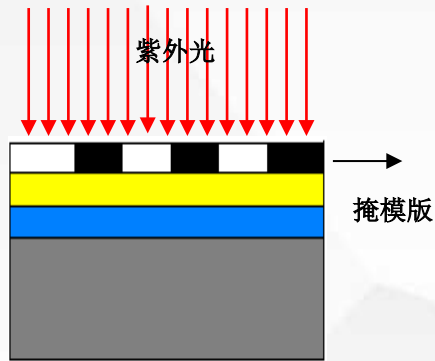
光刻工艺是指利用光刻胶的感光性和耐蚀性,在硅基体材料上复印并刻蚀出与掩模板上图形完全对应的几何图形,是一种图形转移技术。光刻工艺都要经过涂胶、前烘、曝光、显影、坚膜、腐蚀和去胶等七个步骤。



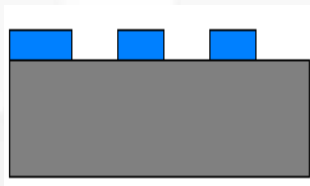
(1) 涂胶, (2) 前烘



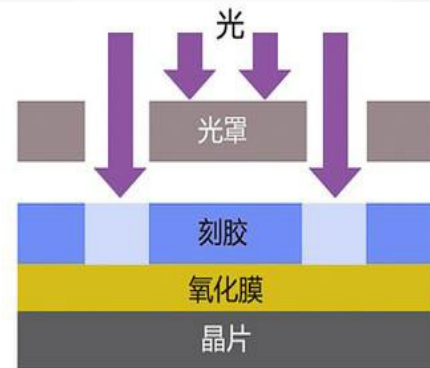
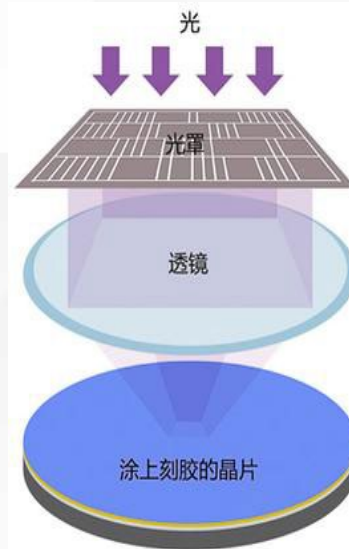
(4) 显影, (5) 坚膜



(3) 曝光



(6) 刻蚀, (7) 去胶

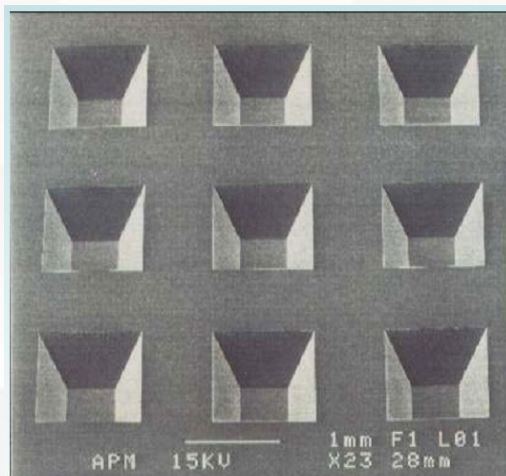


曝光的原理图

光线照射到的地方,其光刻胶会发生变化。使用显影剂去除感了光的部分。

双面光刻

**MEMS结构一般是平面化的三维结构，
两面都有结构或图形，有对准要求，
需要双面光刻。**



双面光刻机



EVG光刻机EVG610

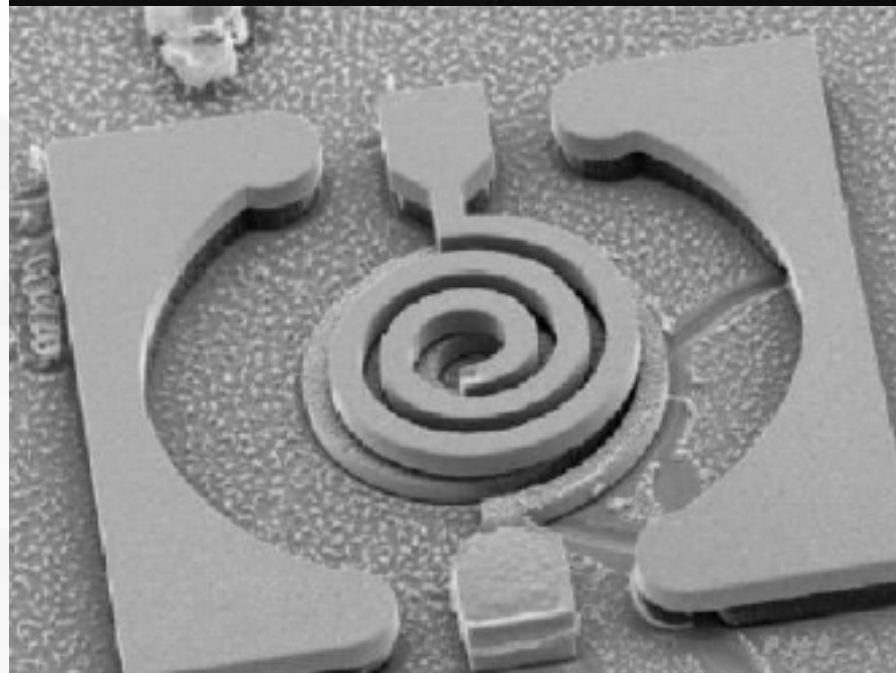
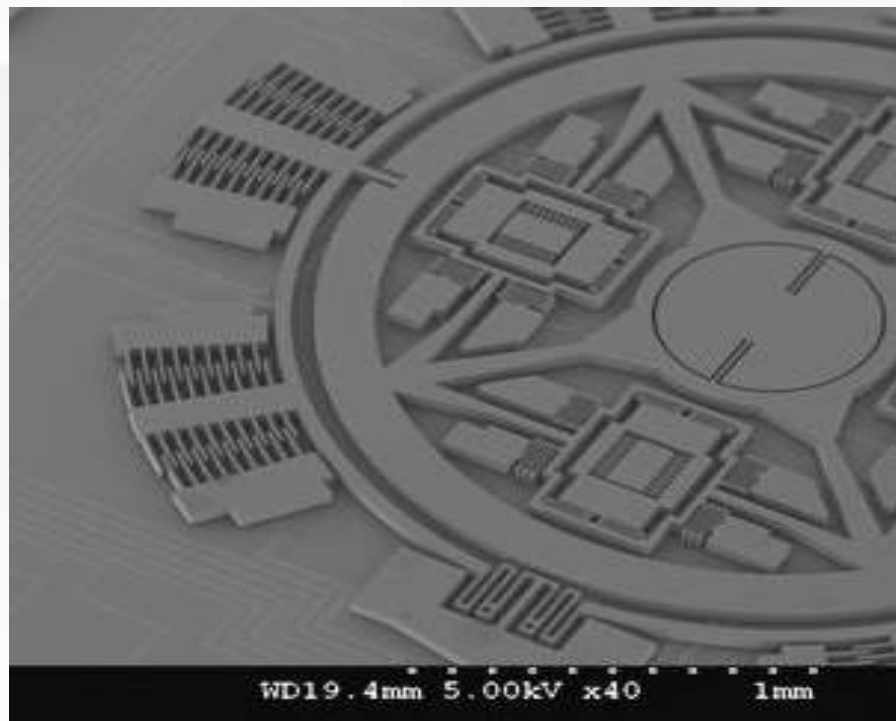


阿斯麦光刻机

表面微细加工工艺

表面微细加工指制造微小尺寸零件、构件、部件、薄膜图形以至整个装置和系统的方法。

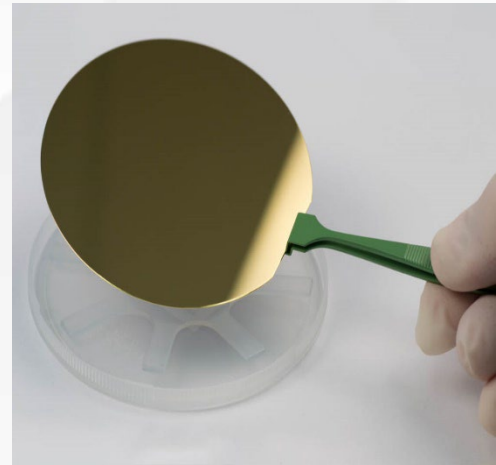
最多的是基于半导体制造技术。



表面微薄膜工艺

常采用蒸镀、溅射、CVD方法，在硅衬底表面上制作各种薄膜，并和硅衬底构成一个复合的整体，根据需要制成许多种薄膜图案。

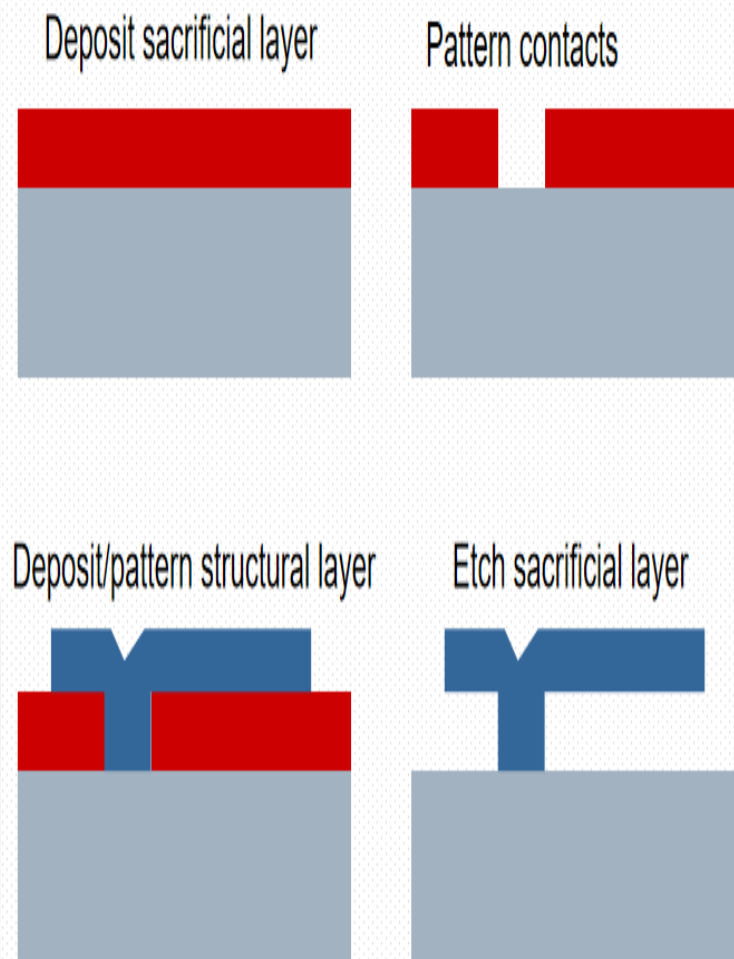
它们有的作为敏感膜，有的作为介质膜起绝缘作用，有的作为信号电极作用，有的作为衬垫层起尺寸控制作用，有的起耐腐蚀、耐磨损作用。



表面牺牲层工艺

在形成微机械结构的空腔或可活动的微结构过程中，先在下层薄膜上用结构材料淀积所需的各种特殊结构件，再用化学刻蚀剂将此层薄膜腐蚀掉，但不损伤微结构件，然后得到上层薄膜结构。

由于被去掉的下层薄膜只起分离层作用，称其为牺牲层。

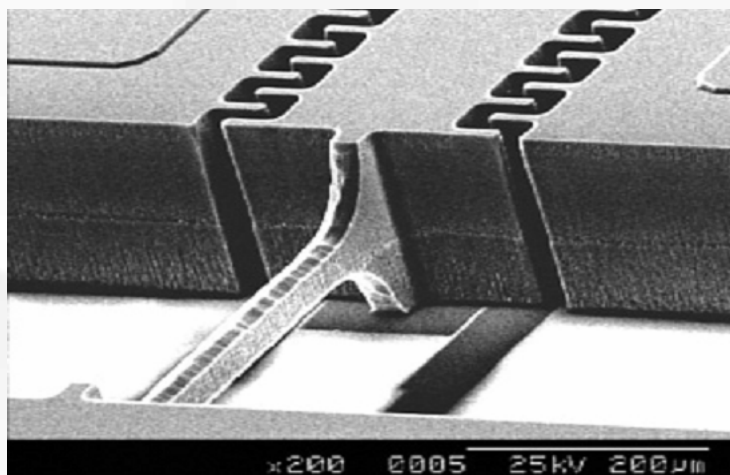


表面微薄膜工艺

体微细加工工艺

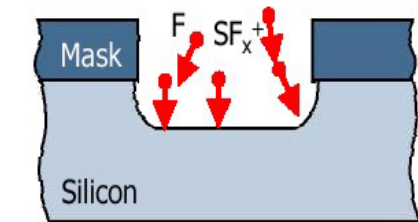
一般采用腐蚀(刻蚀)的方法（体硅各向异性腐蚀）

腐蚀方法分化学腐蚀(湿法腐蚀)和离子刻蚀(干法刻蚀)。

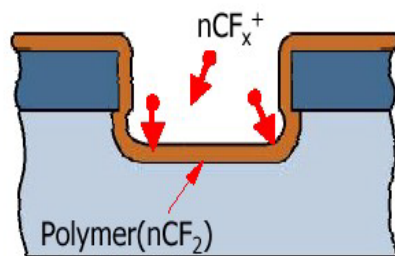


干法刻蚀

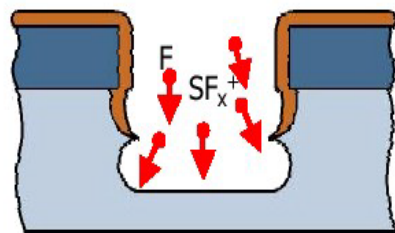
Deep Reactive Ion Etching (DRIE)



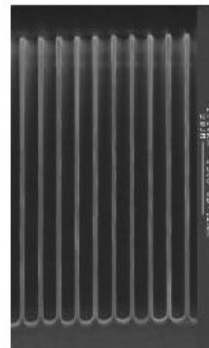
Etch



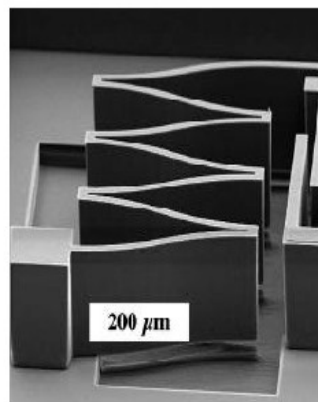
Deposit Polymer



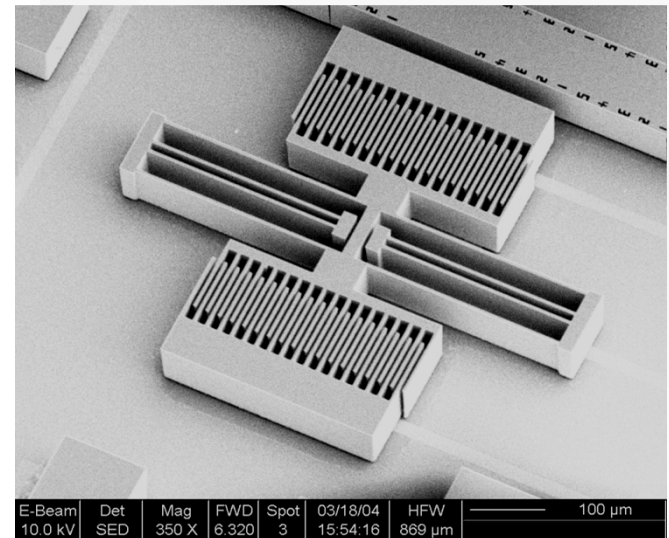
Etch



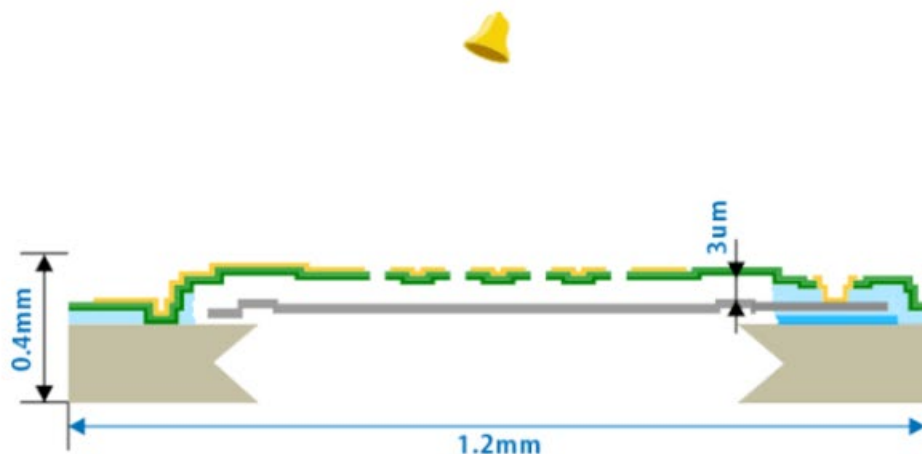
Trenches - Surface Technology Systems



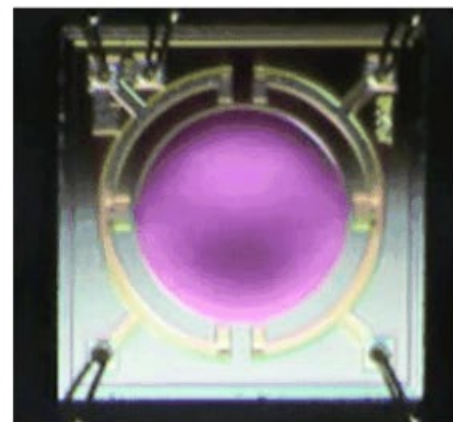
Spring - Klaassen, et al, 1995



麦克风工作原理



电容式工作原理示意图



电容式实物图

MEMS传感器由上下两层构成一个电容器，上层为孔洞结构（下图黄色/绿色部分）术语为背板，下层为密闭结构，术语为振膜。当声音通过进音孔传递到传感器时，声压会导致两层振膜震动，从而导致振膜和背板之间的间距发生变化，进而使振膜和背板之间的电容发生变化，这样也就是将声压信号转变为了电信号。

MEMS底层薄膜随声波震动，从而将声压转换为电容、电阻信号，再经过ASIC芯片处理输出为电信号

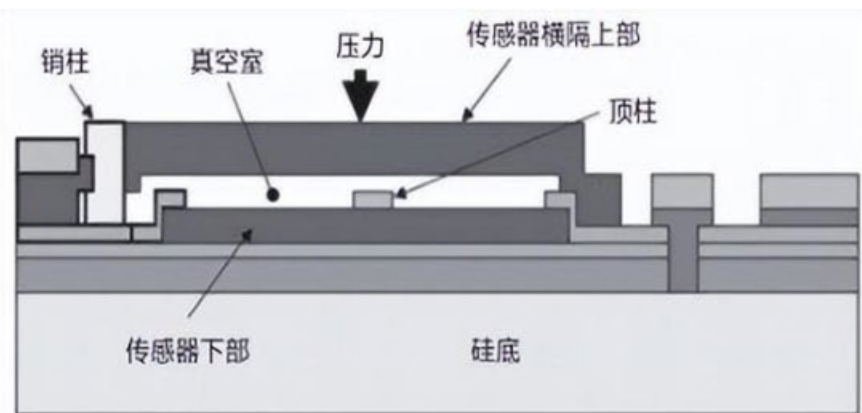
压力传感器



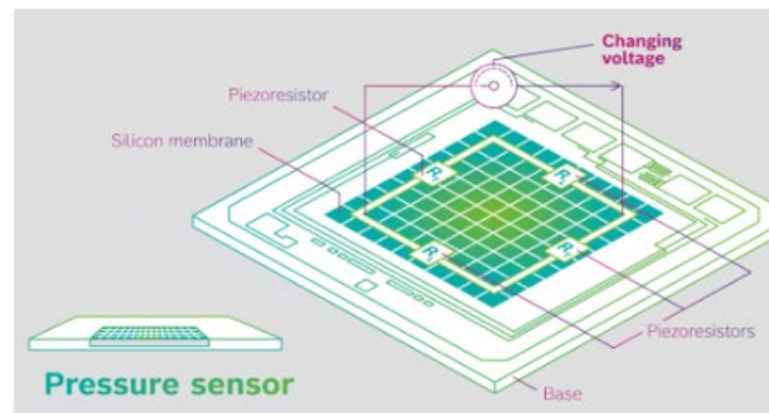
敏感元件

转换元件

转换电路



电容式结构示意图



电容式工作原理示意图

MEMS压力传感器的原理也非常简单，核心结构就是一层薄膜元件，受到压力时变形，形变会导致材料的电性能（电阻、电容）改变。因此可以利用压阻型应变仪来测量这种形变，进而计算受到的压力。

下图是一种电容式**MEMS**压力传感器的结构图，当受到压力时，上下两个横隔(传感器横隔上部、传感器下部)之间的间距变化，导致隔板之间的电容变化，据此可以测算出压力大小。

转换元件

应变电阻



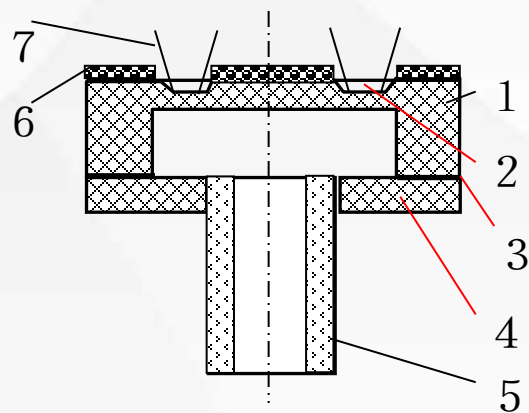
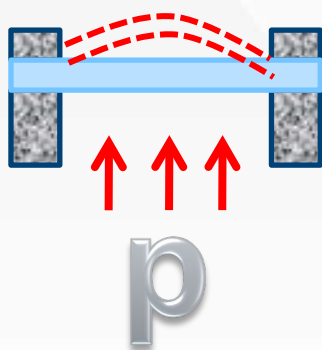
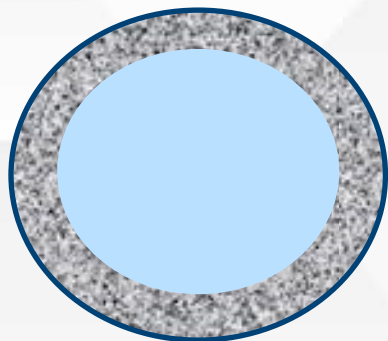
NiCr

PtW

NiCu

压力传感器

周边固支圆形膜片

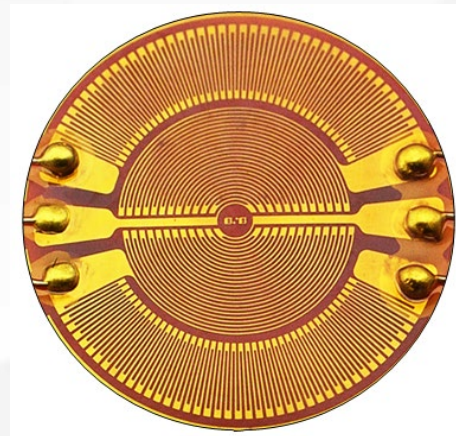
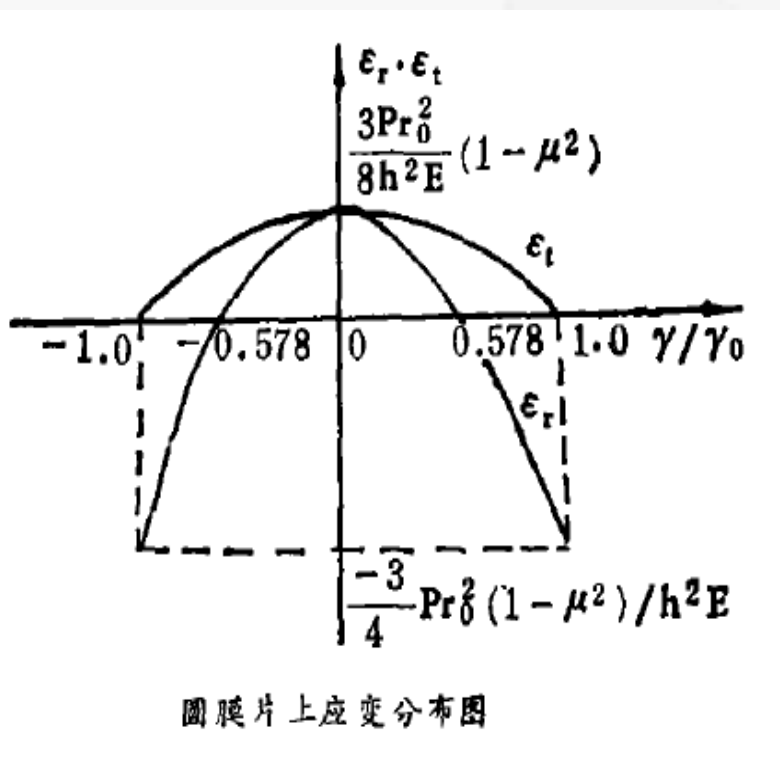
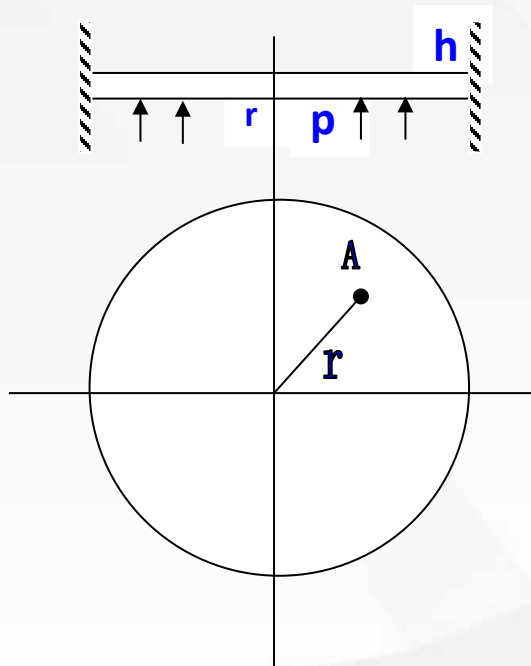


均布压力 P 作用于周边固支的弹性膜片上，使膜片产生形变，利用应变电阻将膜片形变后产生的应变变化转换成电阻变化来测量压力。在压力 P 作用下，根据广义虎克定律，膜片表面与中心相距 r 的任一点A产生的径向和切向应力，即：拉长应变+压缩应变。

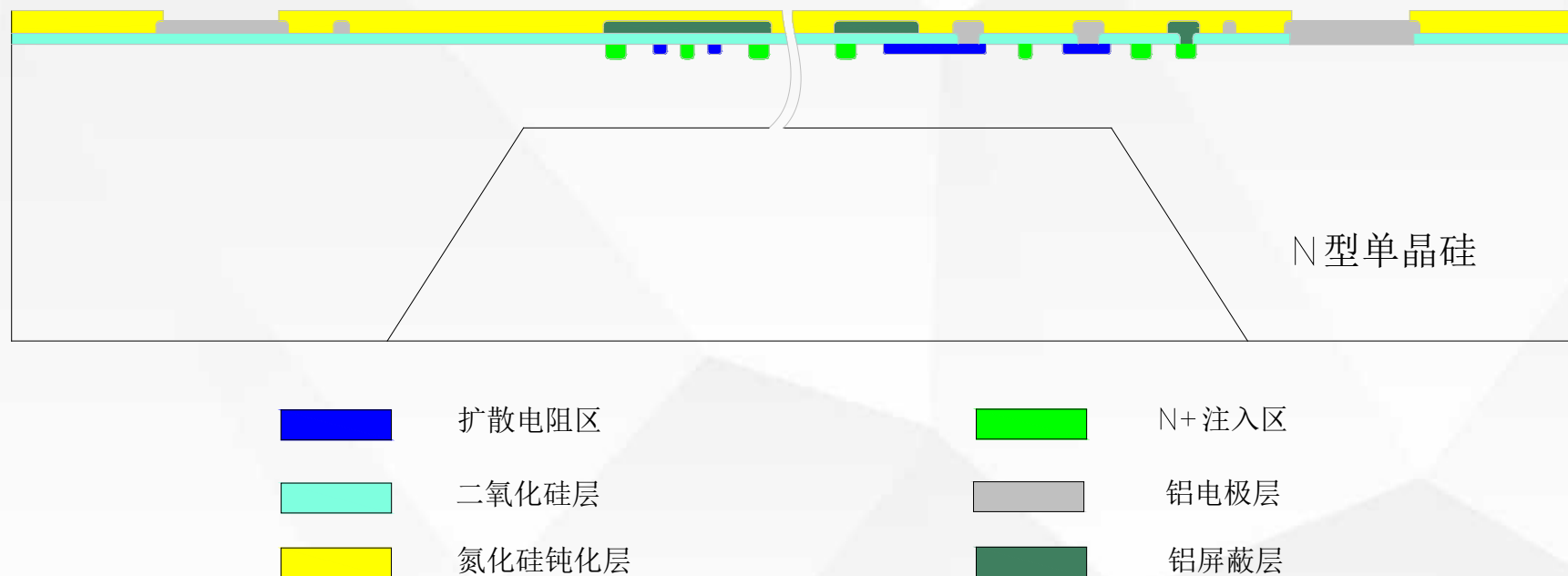
膜片上各点应变分布，在
膜片中心处有正的极大值

在膜片边缘处 $r \rightarrow r_0$ $|\epsilon_r| > |\epsilon_t|$

ϵ_r (伊普西隆) 趋向负最大值

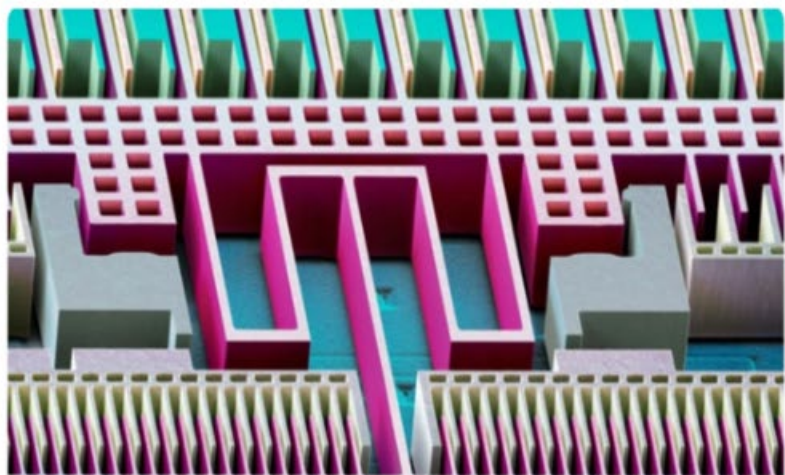


硅微加工压力传感器

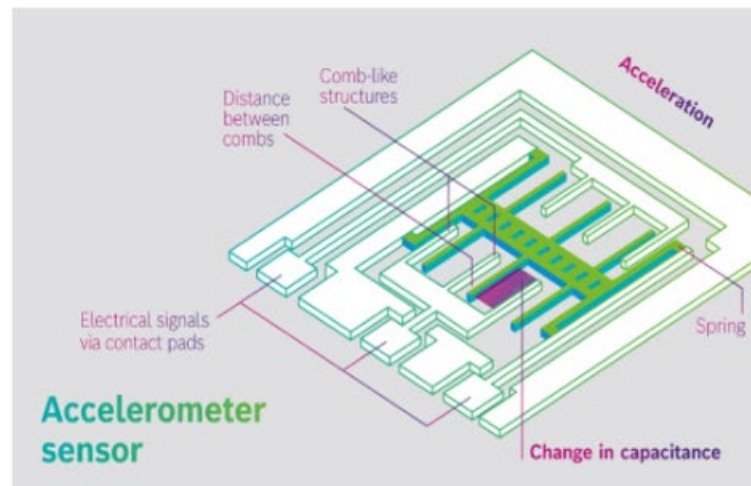


单晶硅压力传感器芯片结构示意图

加速度计

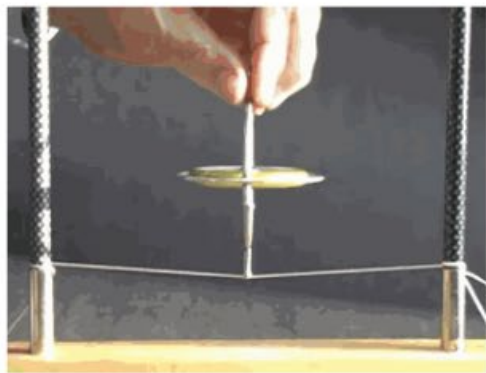


博世MEMS加速度传感器的微观梳状结构

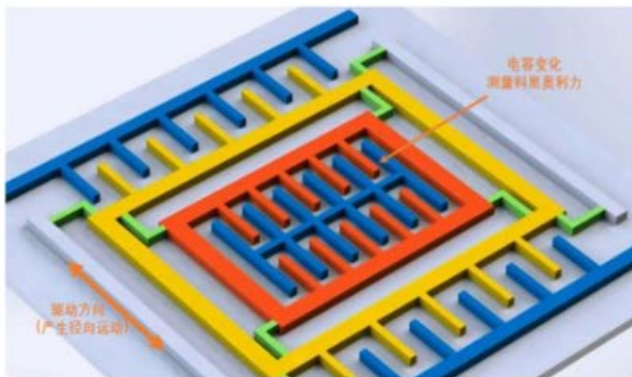


电容式MEMS加速度传感器的工作示意图

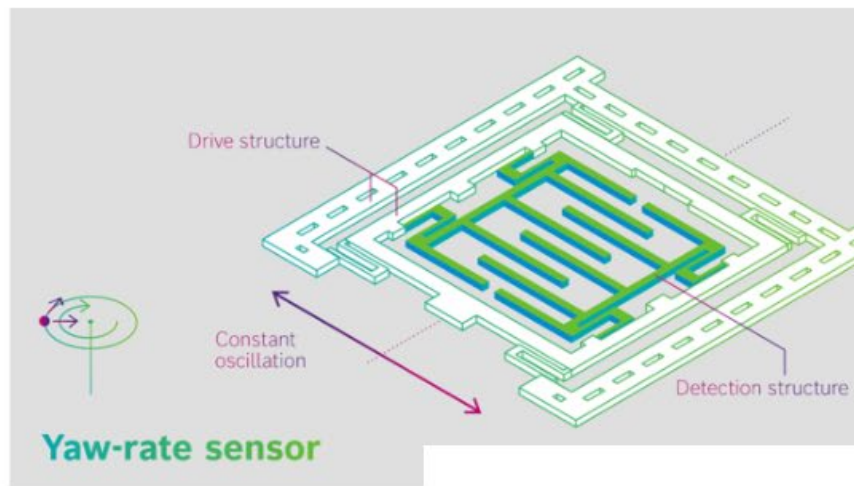
陀螺



传统陀螺仪：高速旋转的陀螺在轴线上保持平衡。



MEMS陀螺仪，与传统的陀螺仪工作原理有差异，因为“微雕”技术在硅片衬底上加工出一个可转动的立体转子很难。**MEMS陀螺仪**陀螺仪利用科里奥利力原理——旋转物体在有径向运动时所受到的切向力。



MEMS陀螺仪的结构，就是一个在圆盘上的物体块，由于在旋转状态中做径向运动，因此就会产生科里奥利力。MEMS陀螺仪通常是用两个方向的可移动电容板，通过电容变化来测量科里奥利力。

如左：MEMS陀螺仪的工作动图，传感器的外框在旋转运动期间沿相反方向摆动，当物体旋转时，内部梳状结构一部分产生偏转，改变梳状结构间的距离，从而改变电容，测量出转角。

平板电容 C 的计算可以通过以下公式进行： $C = \epsilon_r * \epsilon_0 * S / d$ 其中：

C 是电容器的电容，单位是法拉（F）。

ϵ_r 是相对介电常数，无单位，真空中的相对介电常数为1。

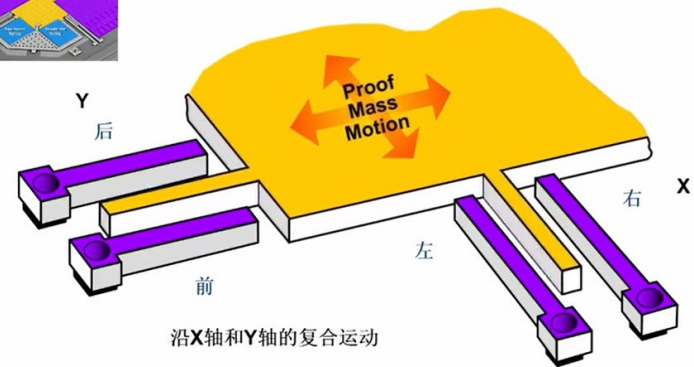
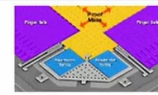
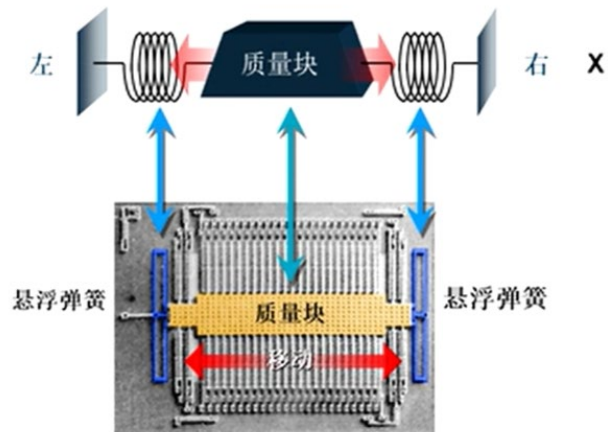
ϵ_0 是真空介电常数，单位是F/m，其值约为 8.86×10^{-12} 。

S 是极板的面积，单位是平方米。 d

d 是极板间的距离，单位是米。

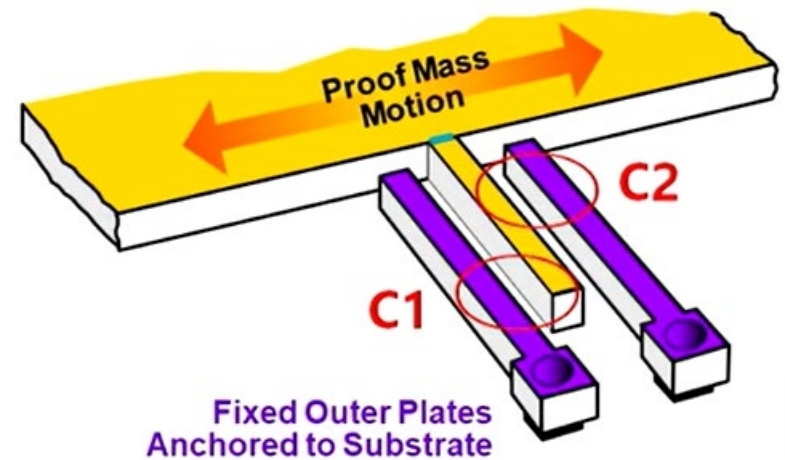
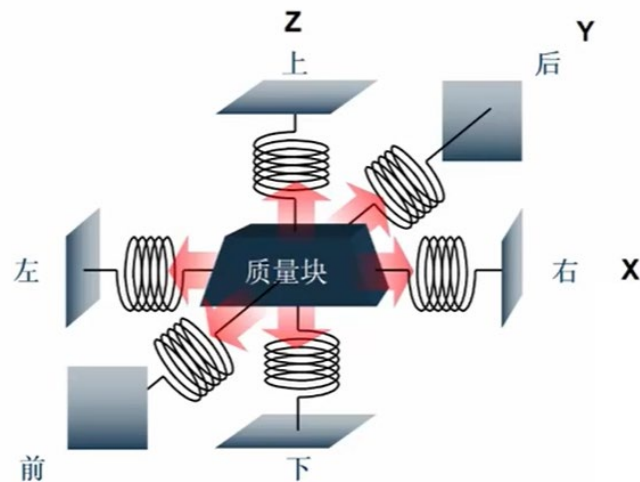
► 单轴加速度计内采用相同的组件

- 左 / 右 (X轴)



► 三轴加速度计

- 左 / 右 (X)
- 前 / 后 (Y)
- 上 / 下 (Z)

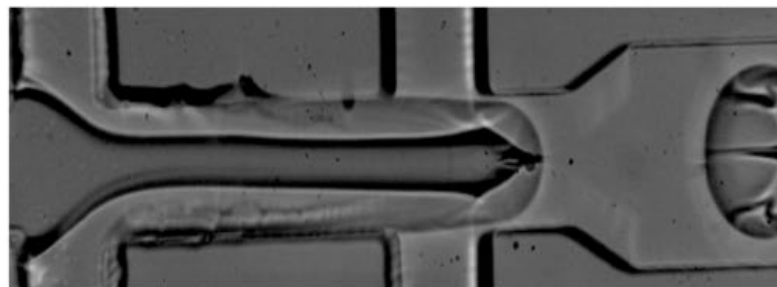
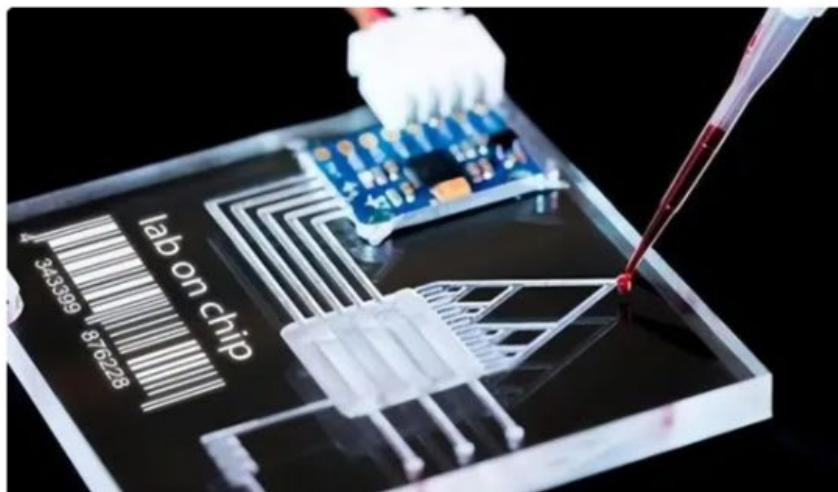


MEMS磁传感器工作原理



磁阻传感器是第四代磁传感技术，基于纳米薄膜技术和半导体制备工艺，通过探测磁场信息来精确测量电流、位置、方向、转动、角度、应力应变、温度、光等物理参数。

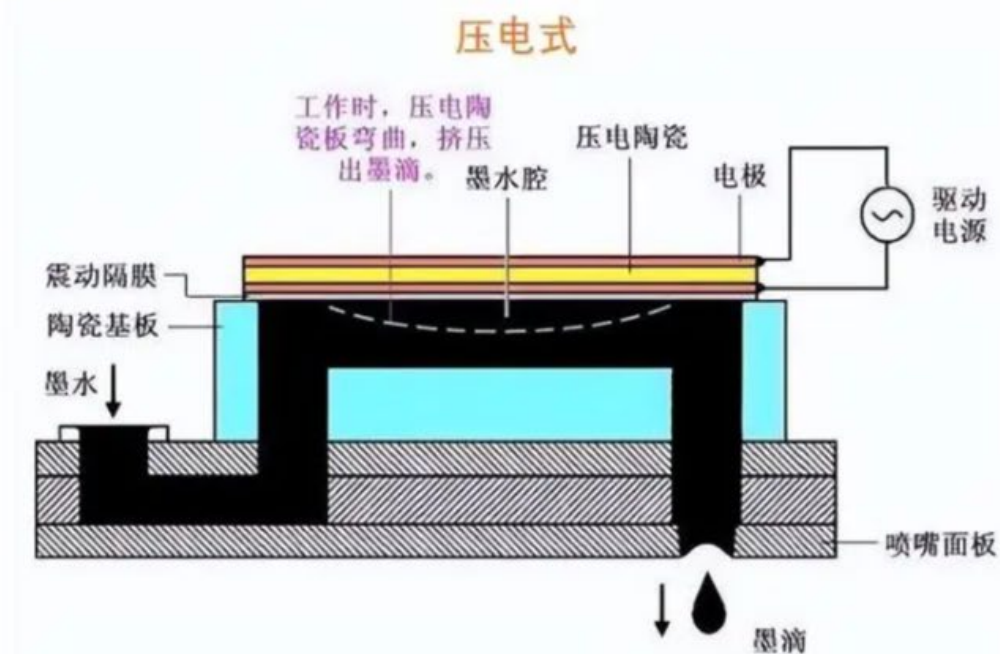
MEMS微流控传感工作原理



流体在微管道中流动、捕捉的动态过程

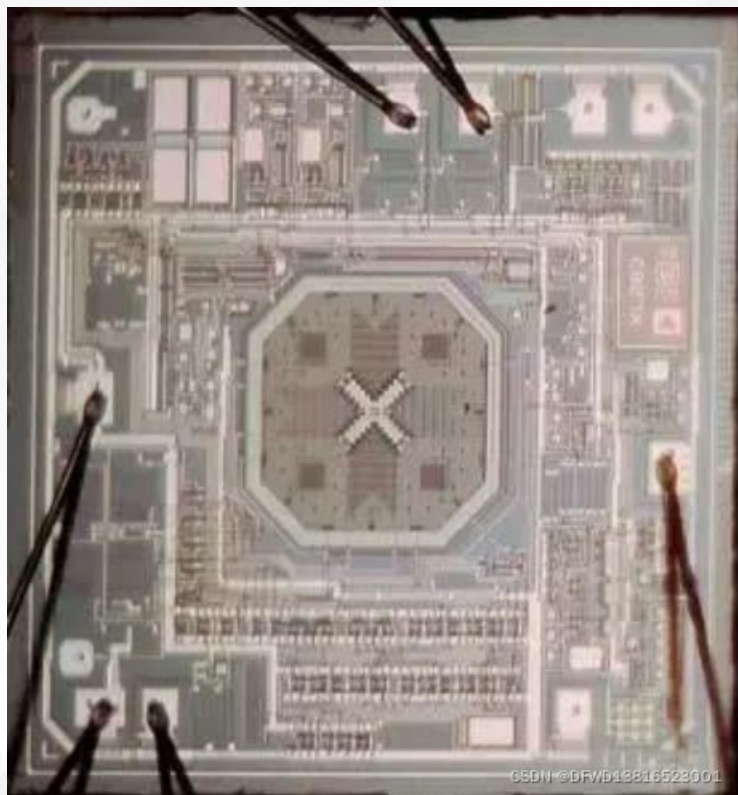
MEMS微流控（microfluidics）系统，就是一种流量控制，是精确控制和操控液体流动的装置，使用几十到几百微米尺度的管道，一般针对微量流体，用于**生物医药诊断、基因测序等**领域的高精度和高敏感度的分离和检测，具有样品消耗少、检测速度快、操作简便、多功能集成、体小和便于携带等优点。

MEMS执行：MEMS喷墨打印头



MEMS喷墨打印头其实和刚介绍的MEMS微流控系统是同一类型，均属于MEMS微流控领域的应用，不过不同的是，MEMS微流控系统主要用在生物检测上，MEMS喷墨打印头是用在打印机上，控制油墨的喷吐。

简单点说，喷墨打印头的作用是挤出墨汁，有的是利用压电薄膜震动来挤压墨水，有的是利用加热气泡变大，将腔体内的墨汁挤出。

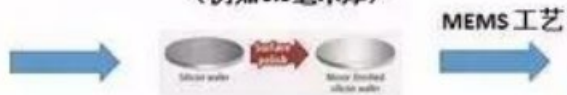


ADXL203（单片集成了MEMS与IC）

从融化的硅中拉出



抛光至指定厚度
(例如0.5毫米厚)



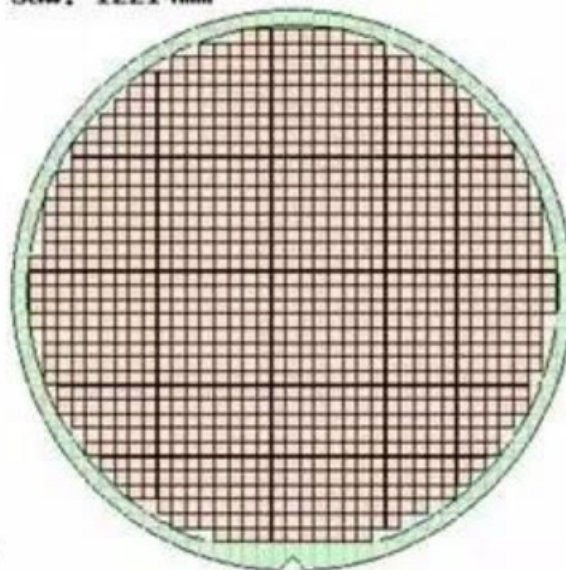
CSDN @DFWD13816523001

Die Width: mm
Die Height: mm
Horizontal Spacing: mm
Vertical Spacing: mm
Wafer Diameter: mm
Edge Clearance: mm
Flat/Notch Height: mm

Re-calculate

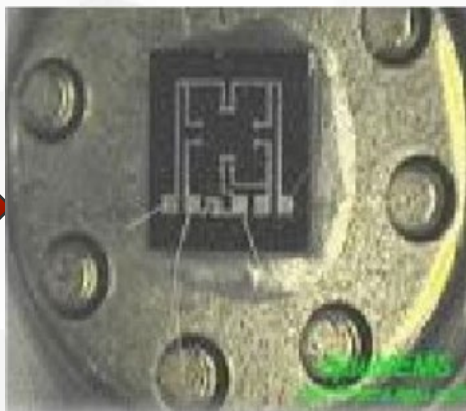
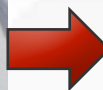
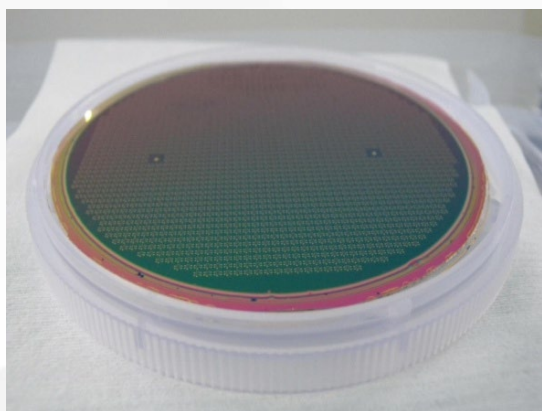
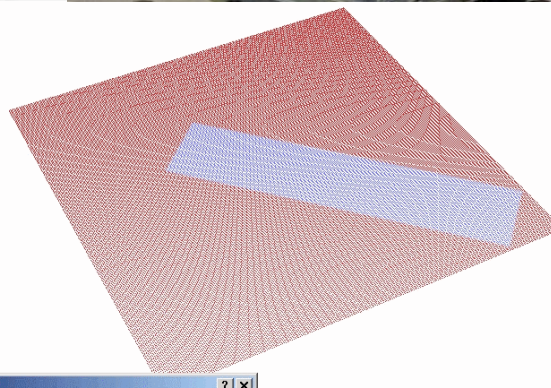
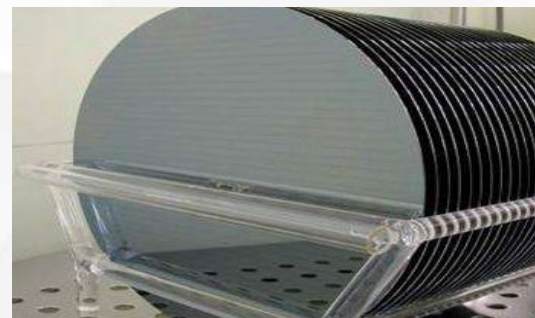
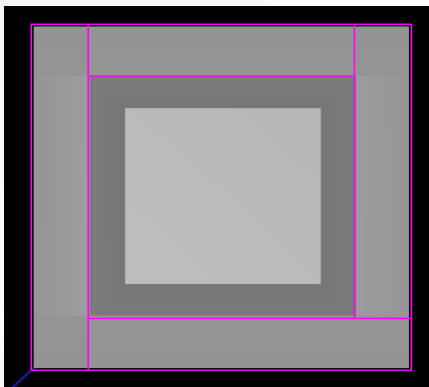
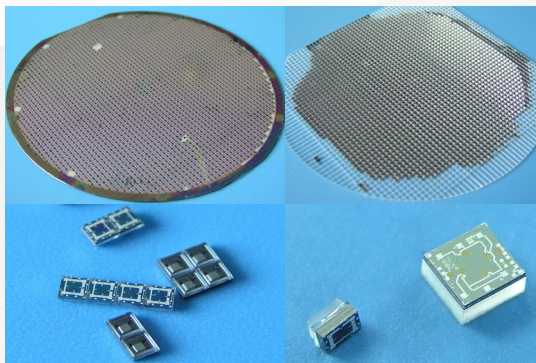
To save the plot in PNG format
right-click on it and select "Save As..."

DPI: 1029
Saw: 12214mm

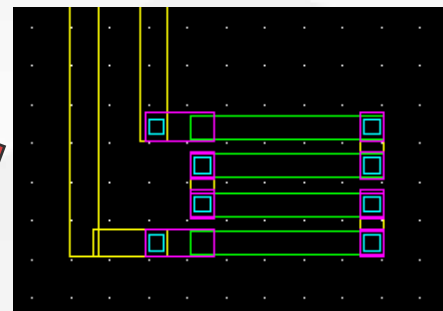
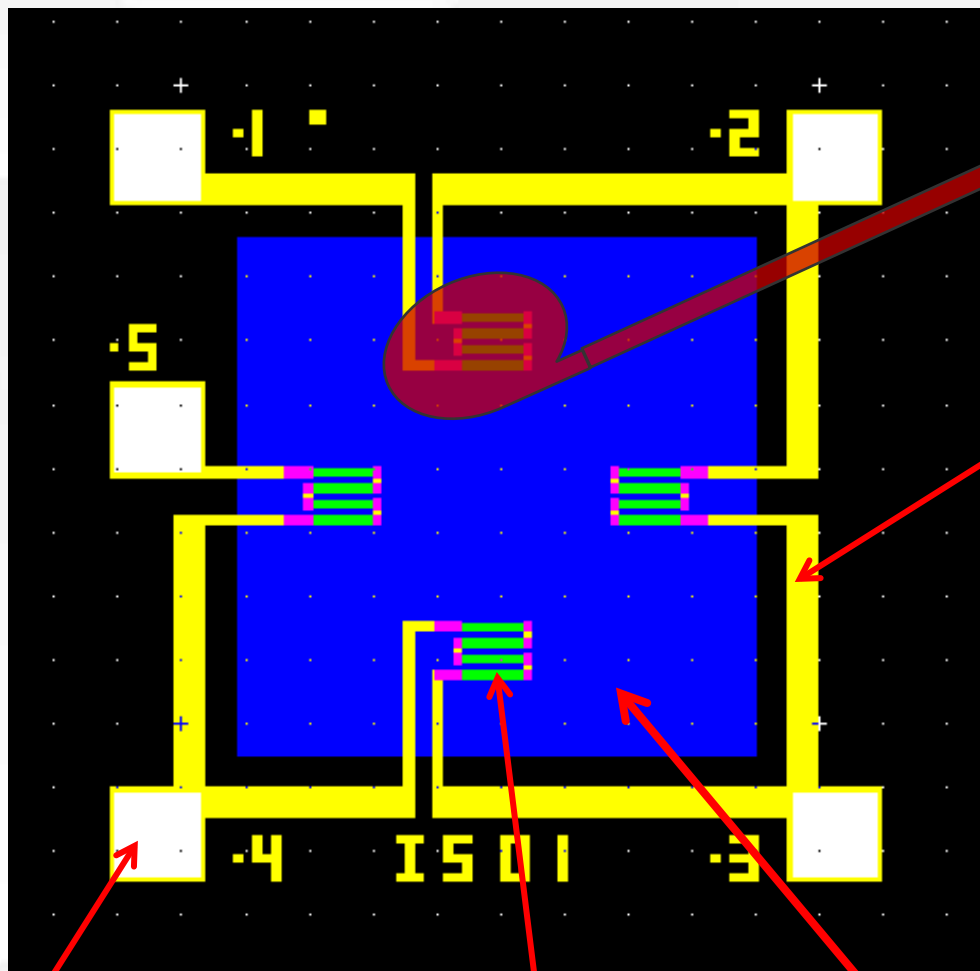


© Silicon CSDN @DFWD13816523001

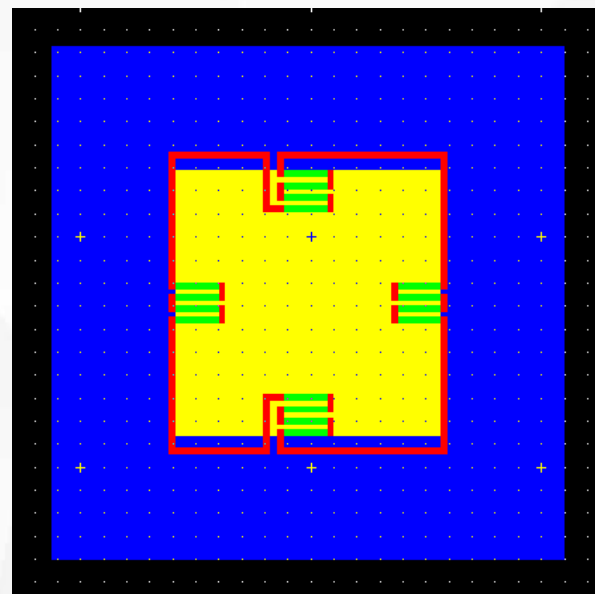
MEMS传感器芯片



版图设计

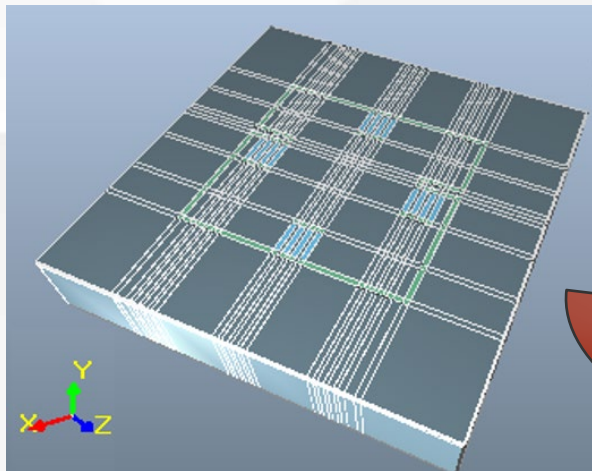


铝金属线

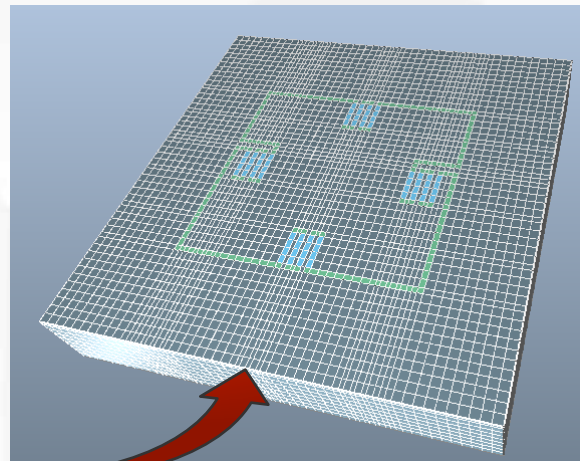


简化版图

性能分析-网格划分

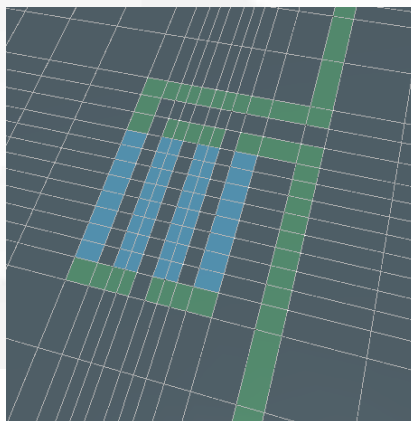
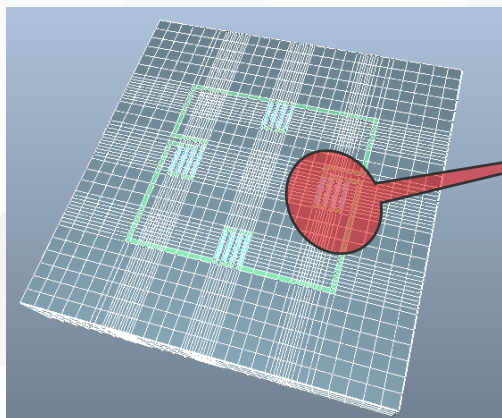


最大网格尺寸: $510\mu\text{m}$



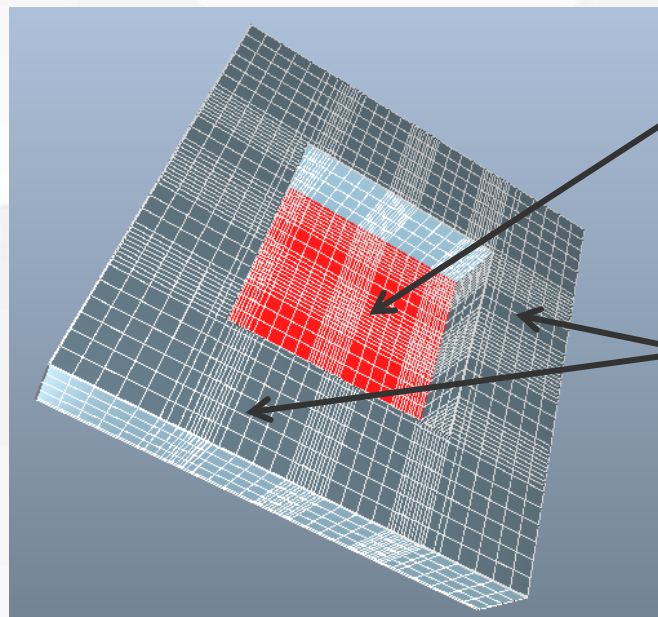
网格细分, 最大网格尺寸: $50\mu\text{m}$

部分结构网格细化:



关键结构（压阻）最大网格尺寸: $30\mu\text{m}$
其它区域最大网格尺寸: $100\mu\text{m}$

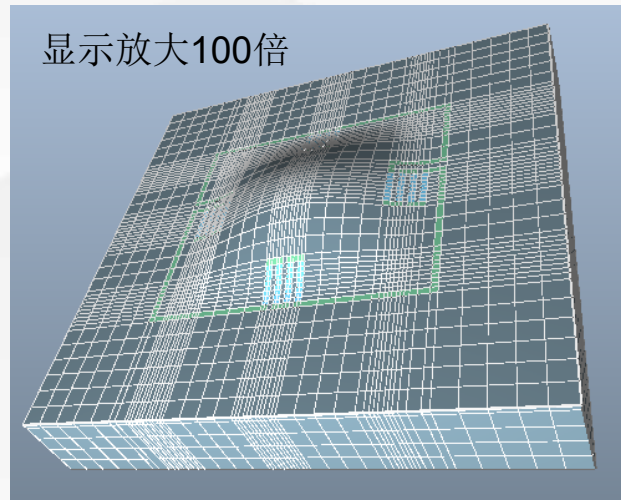
性能分析



施加压力

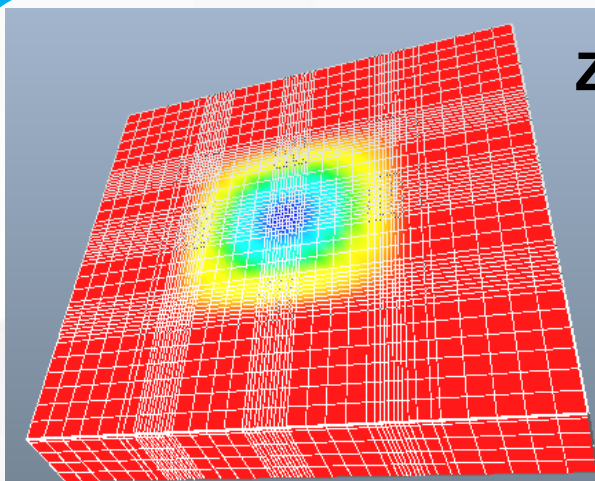
边界条件：固定

显示放大100倍



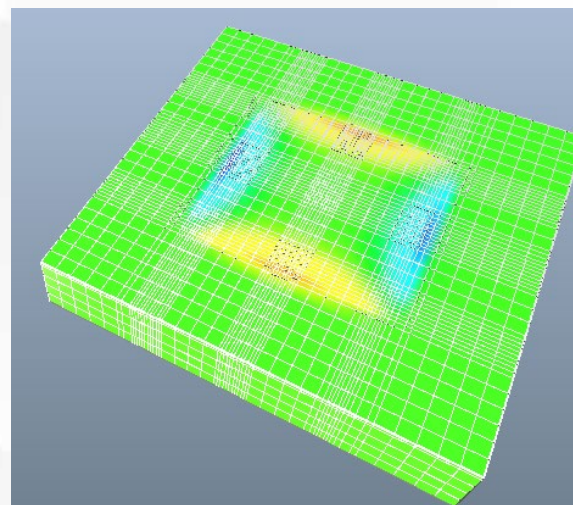
Simulation Type:
Static – Stress/Displacement

Z方向位移



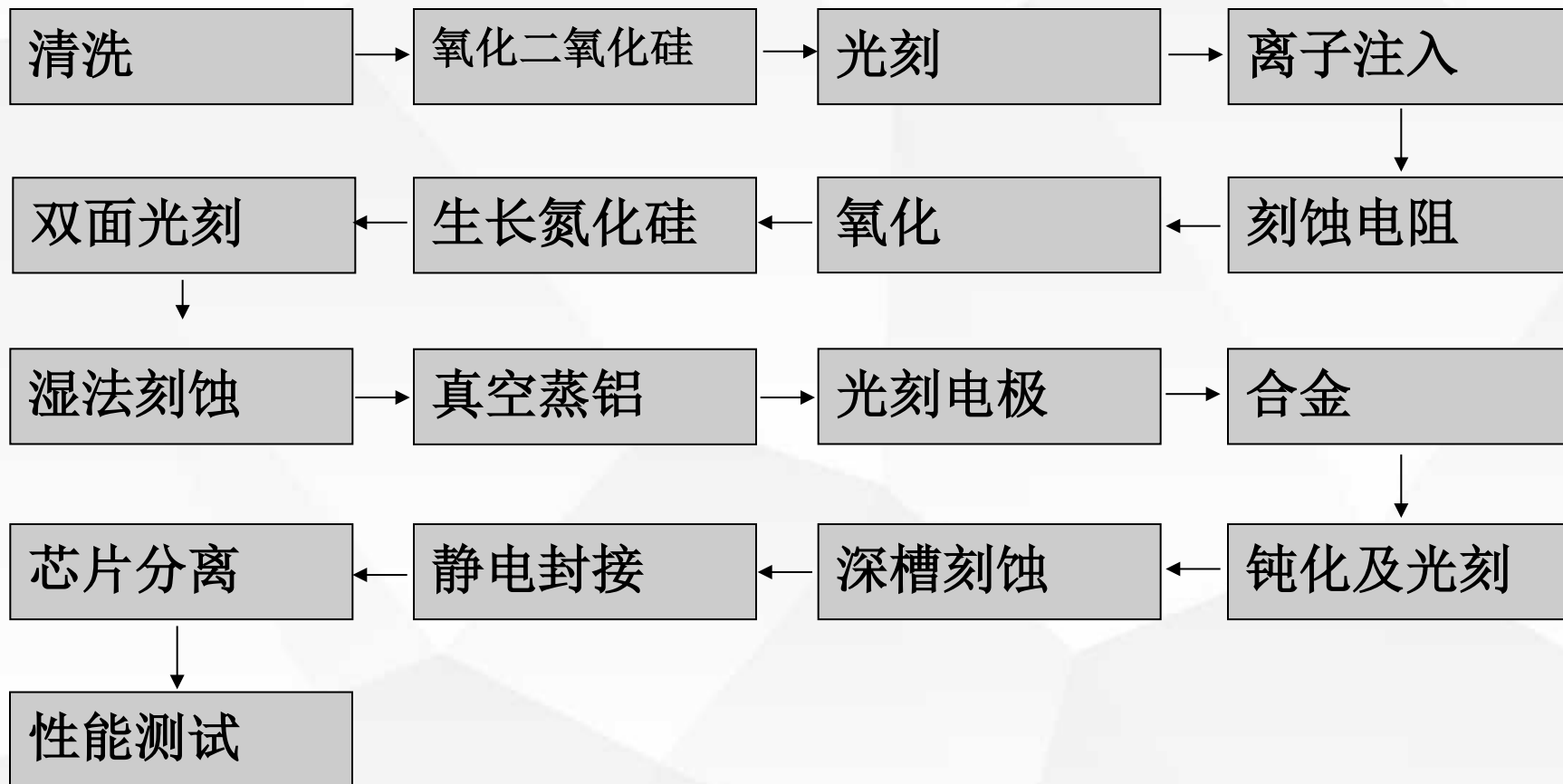
Displacement Z um
4.06604e-005
-0.127061
-0.254163
-0.381265
-0.508367
-0.635469
-0.762571
-0.889672
-1.01677
-1.14388
-1.27098
-1.39808

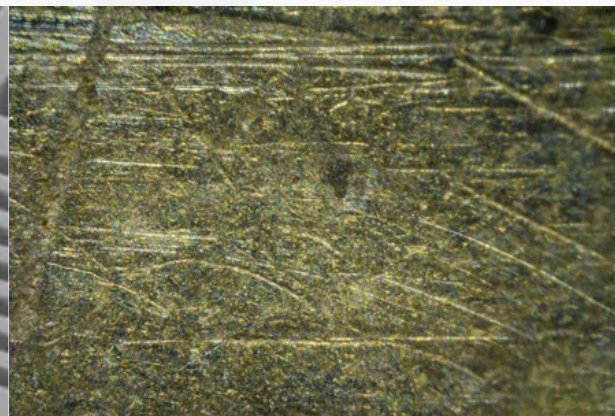
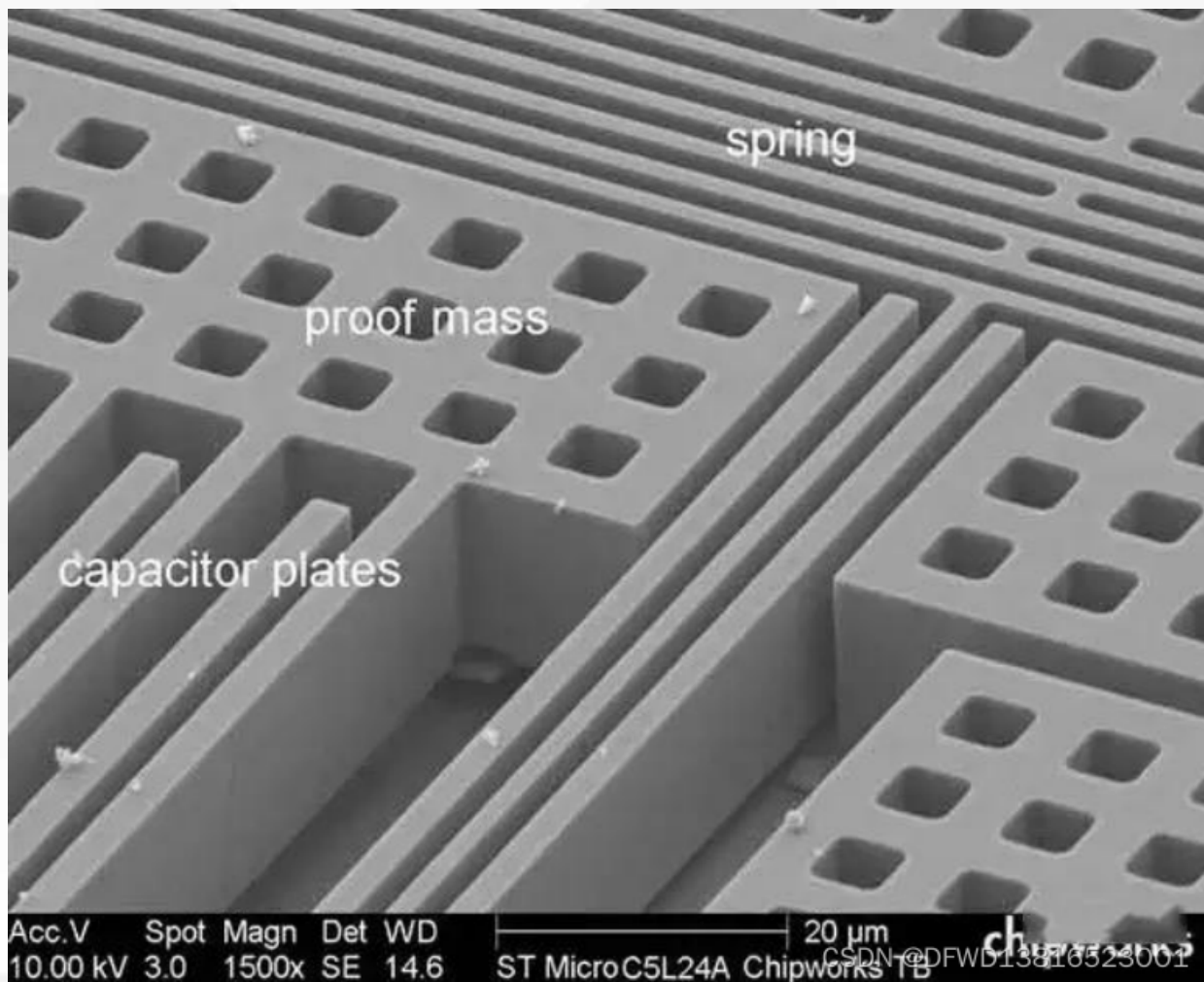
应力



Stress Sxy MPa
27.6622
22.8225
17.9828
13.1431
8.30336
3.46365
-1.37605
-6.21576
-11.0555
-15.8952
-20.7349
-25.5746

制造工艺流程



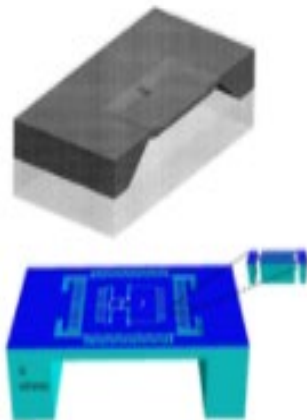


实物图，比例尺为20微米，即20/1000毫米

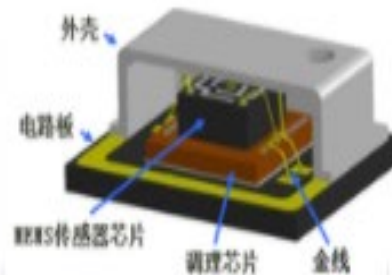
封装



晶圆



芯片



封装品



模块或系统级产品

类别	表压结构	2mm×2mm (表压)	3mm×3mm (表压)
示意图			
类别	绝压结构	1mm×1mm (绝压)	2mm×2mm (绝压)
示意图			



压力传感器标定方法

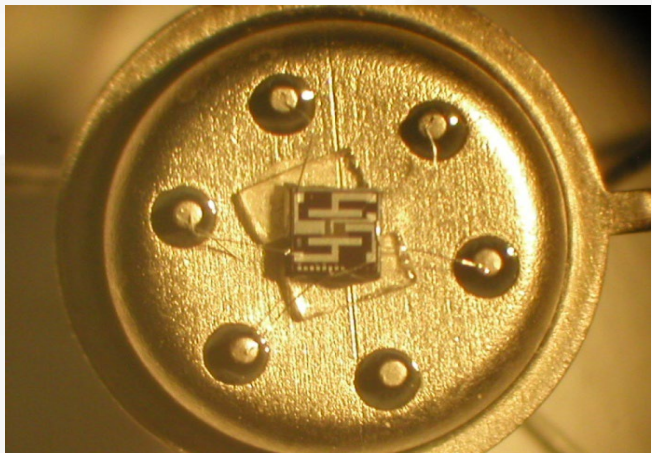
活塞压力计



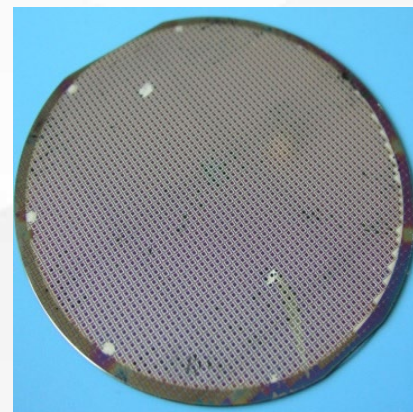
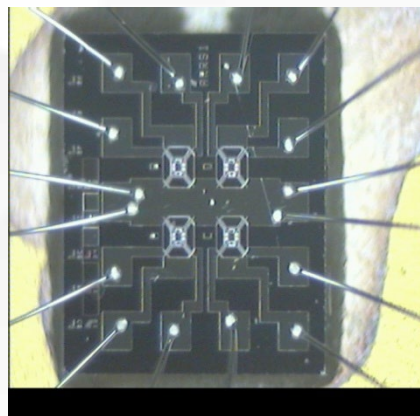
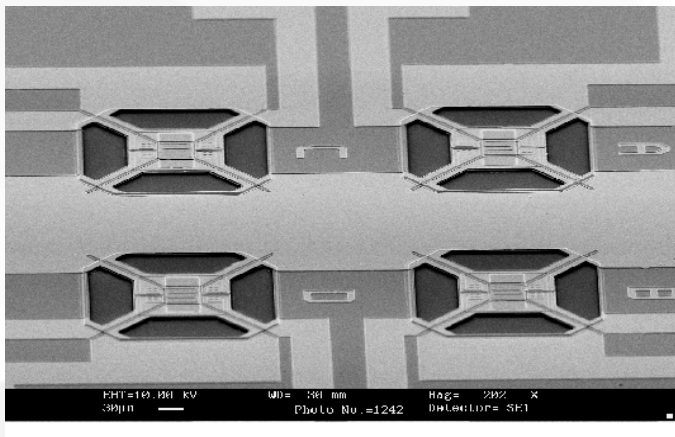
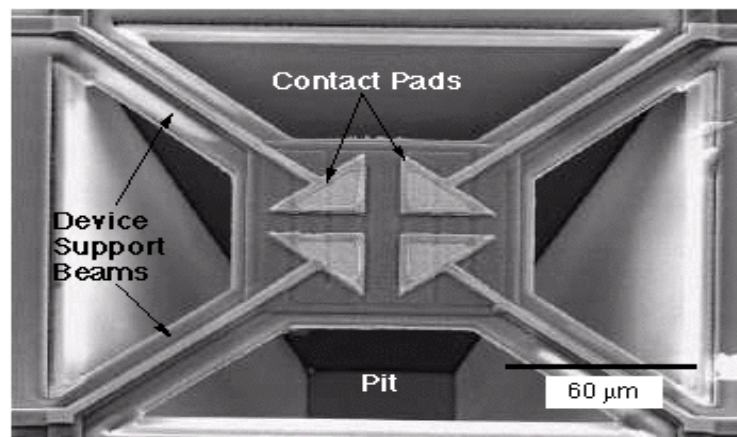
气动压力计



硅MEMS气体传感器



俄罗斯MEMS敏感芯片



大连理工大学MEMS敏感芯片

MEMS传感器特点

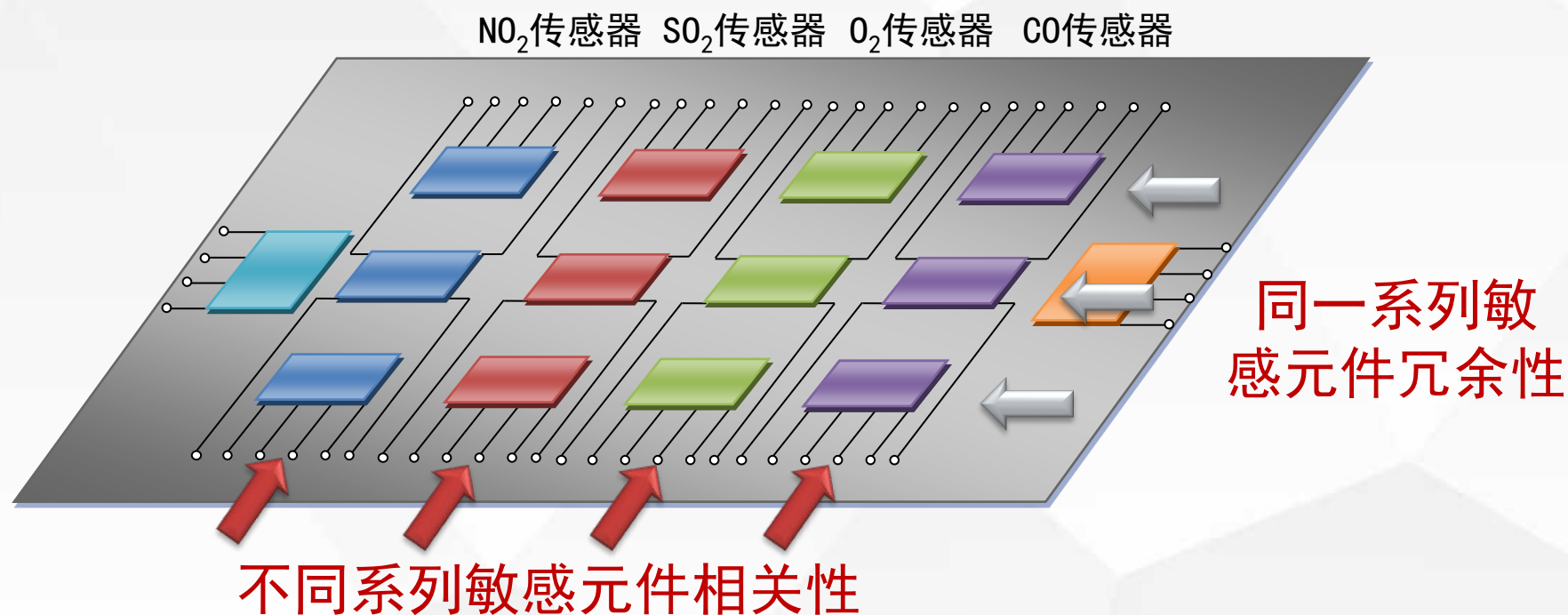
- 1、制造工艺技术特点：微细加工技术**
- 2、微型化特点：体积小**
- 3、低功耗特点：功率低**
- 4、批量制造特点：规模化**
- 5、集成化、阵列化、网络化特点**

MEMS传感器发展趋势

- **向小型化,, 多功能、阵列化、集成化方向发展。**
- **智能化、网络化方向发展。**
- **随着纳米技术深入, 纳机电系统方向发展。**

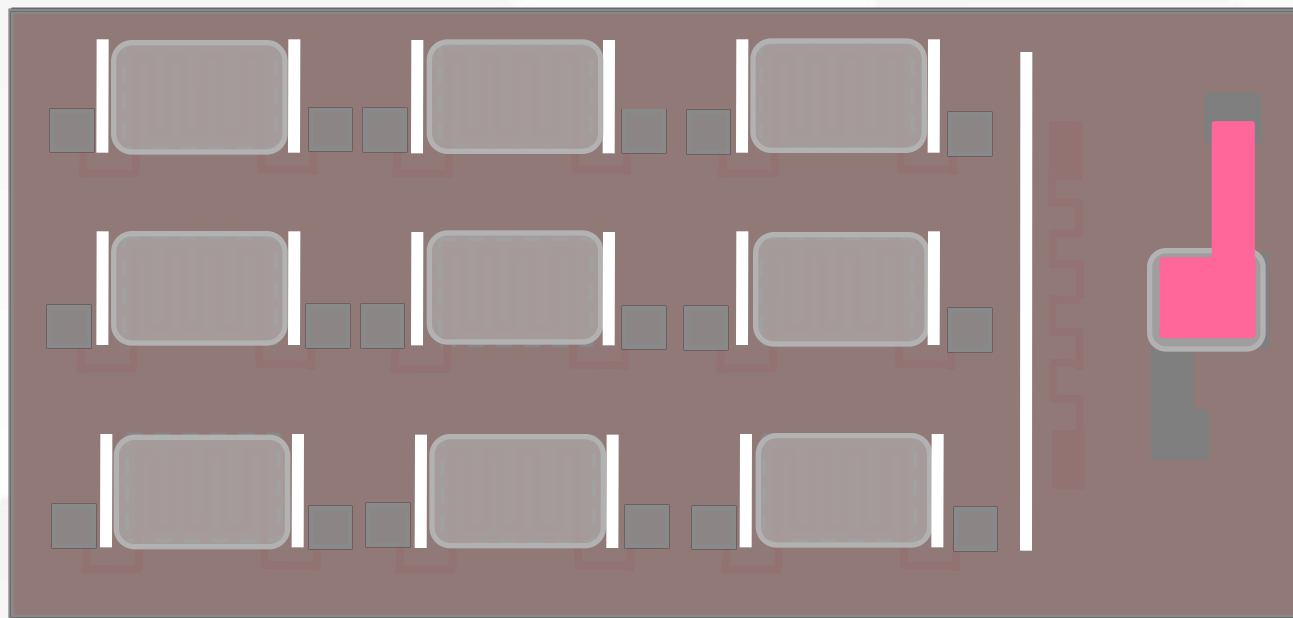
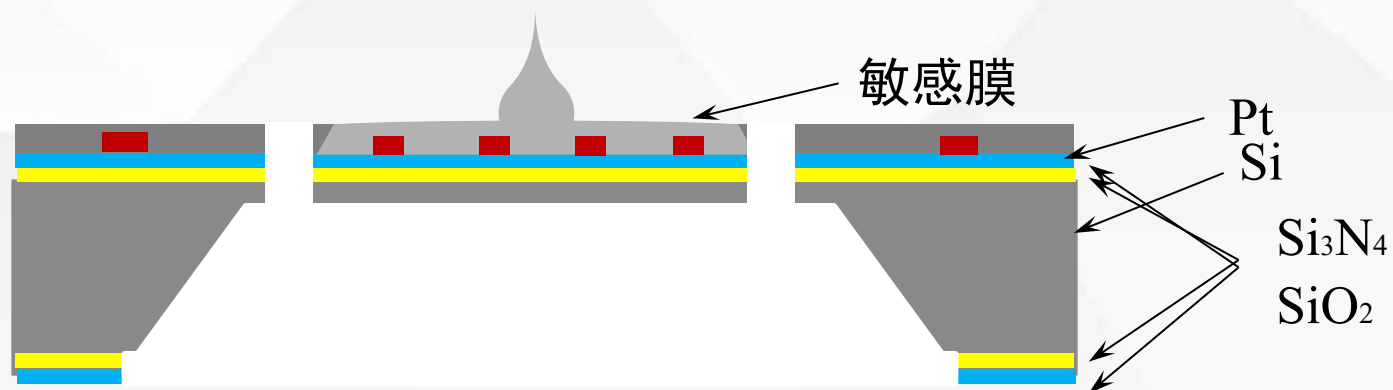
集成化、阵列化、网络化传感器

阵列化气体传感器



针对传感器相关及冗余信息，利用支持向量机方法改善传感器选择性，提高测量准确度。

阵列传感器



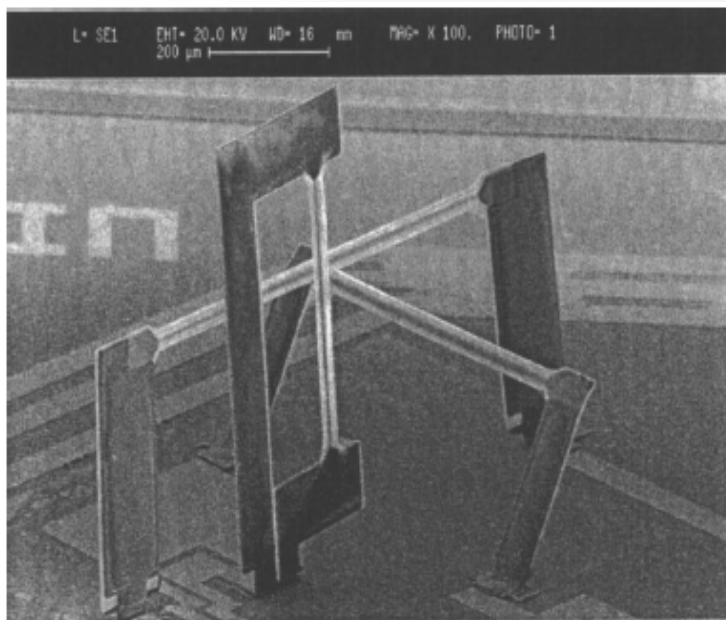
电极制作

敏感膜制作

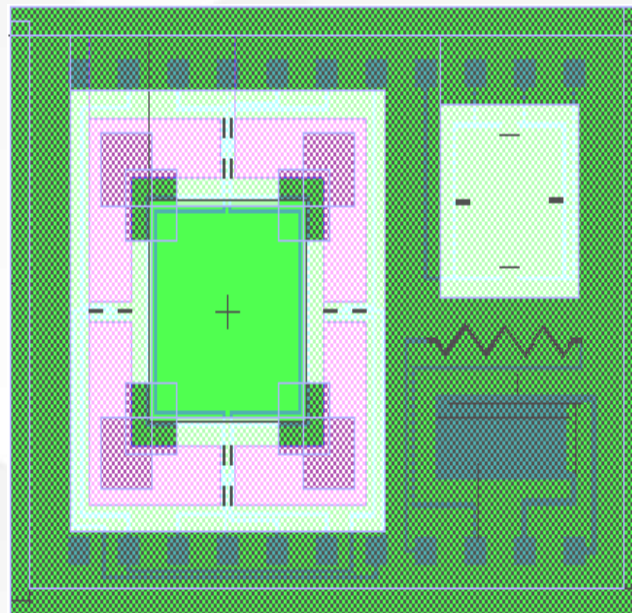
悬膜结构制作

隔热通槽制作

集成化传感器

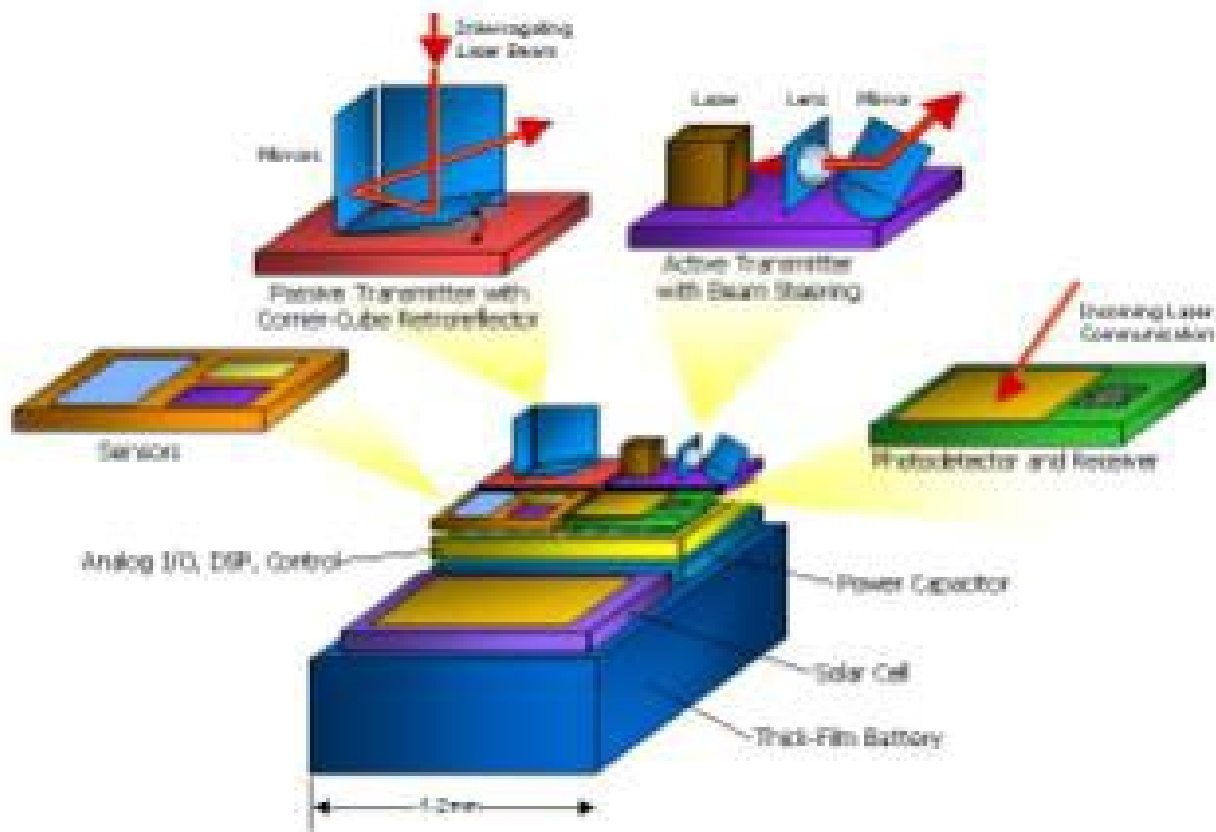


三维热线式微系统芯片



加速度、压力和温度
三参数微系统芯片

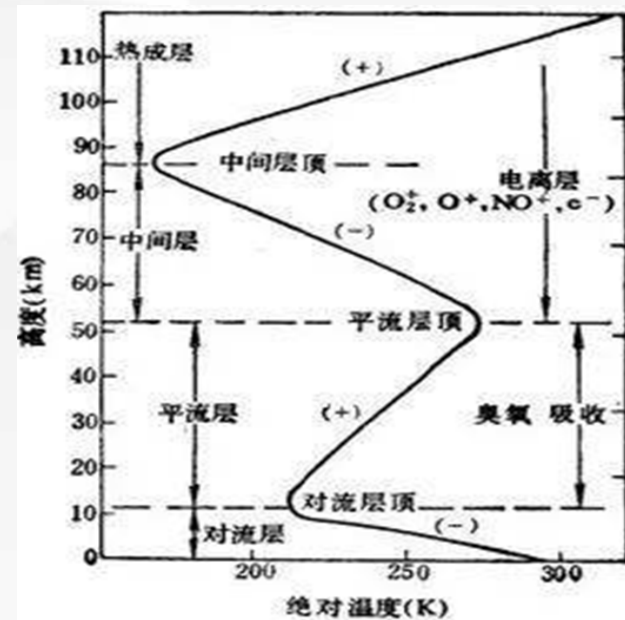
智能灰尘-网络化传感微系统



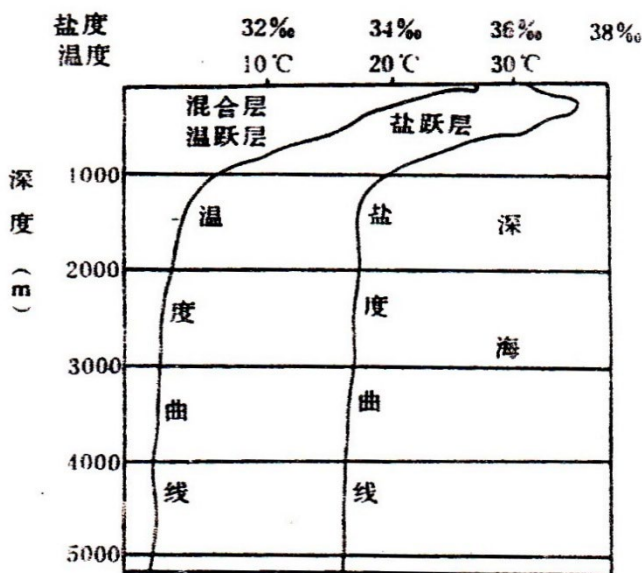
无线传输的振动、温度、噪声微系统芯片

气压传感器与海水深度传感器复杂环境适应性

气压传感器



海水深度传感器



温变环境适应性-压力传感器快速温度补偿技术

血压计



IMPLANTED PRESSURE SENSOR

People with congestive heart failure could have a permanent implant in the aorta or left atrium

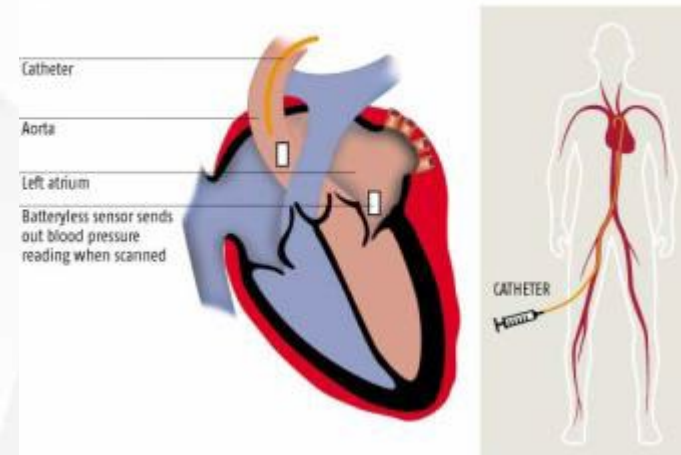
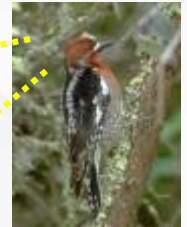


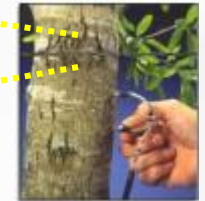
Figure 1. Implantable blood pressure monitoring system

无线传感网

RF Telemetry
Macro-organisms



Sap Flow Sensor
Array



Minirhizotron
Array



E-nose 'Smart Dust' tagged Insects



Automated E-tongue



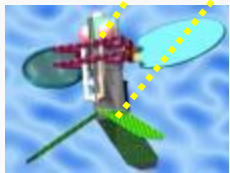
Smart Sensor Web



Micro-weather
Stations



Sensor Clustered
MEMS Insects



Multiparameter
Soil Probes

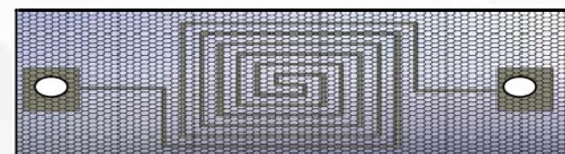
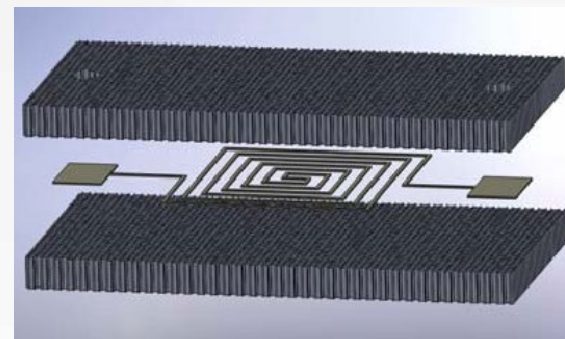
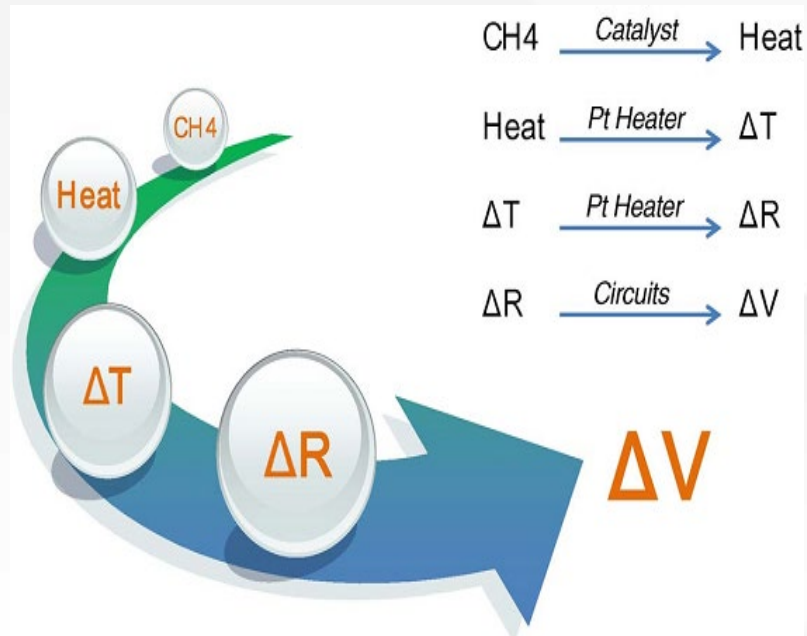


项目名称: A1203 纳米管阵列瓦斯传感器设计及相关机理研究

申请人: 张洪泉 电话: 0451-82568435

依托单位: 哈尔滨工程大学

通讯地址: 哈尔滨市南岗区南通大街 145 号 31 号楼 134 室





项目批准号	62071138
申请代码	F0123
归口管理部门	
依托单位代码	15000108A0347-0671



620711381002161

国家自然科学基金委员会 资助项目计划书

资助类别: 面上项目

项目名称: 电化学微增材制造氢气传感微系统关键技术及机理研究

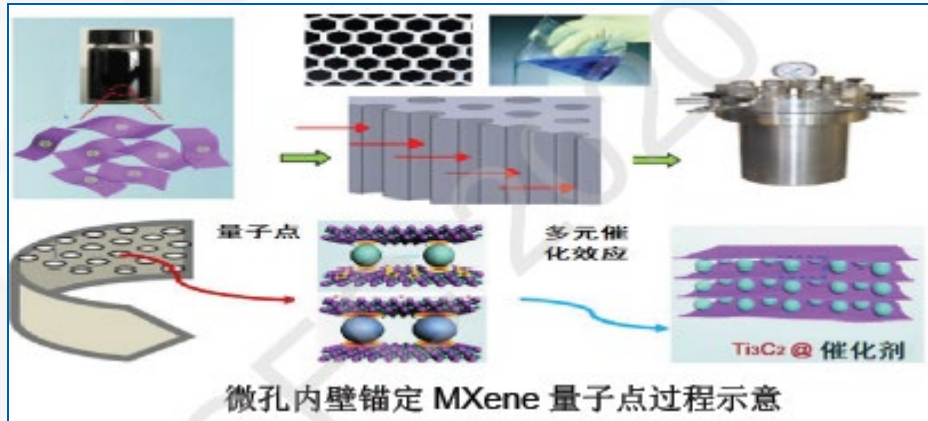
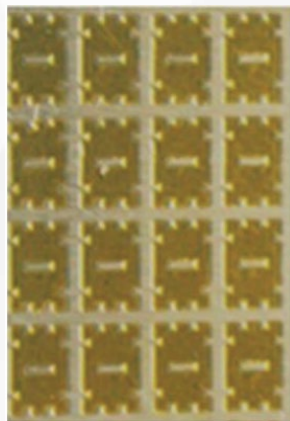
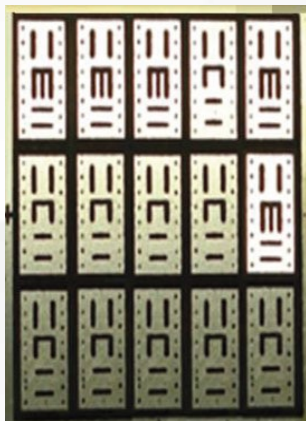
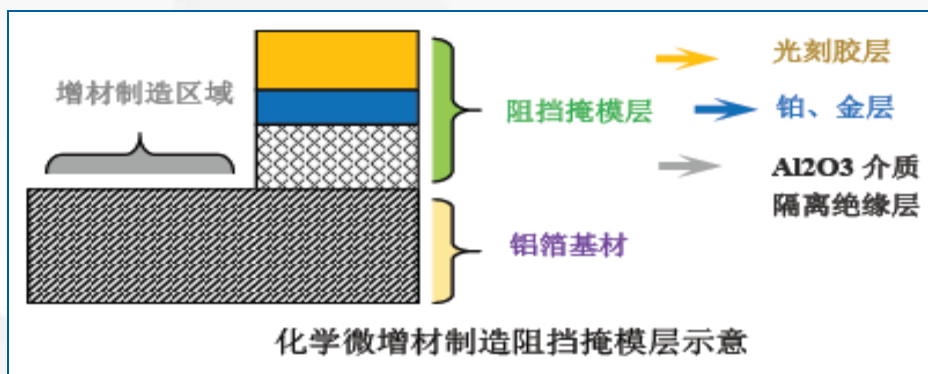
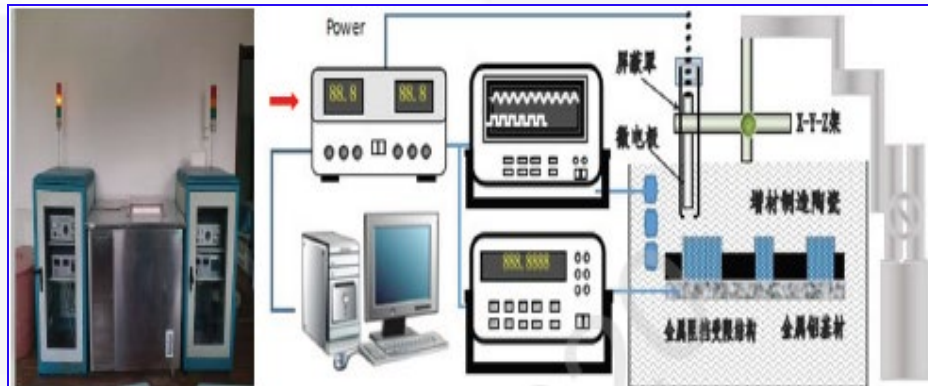
直接费用: 57万元 执行年限: 2021.01-2024.12

负责人: 张洪泉

通讯地址: 哈尔滨市南岗区南通大街145号

邮政编码: 150001 电话: 0451-82518042

电子邮件: zhanghq1@126.com



一、国际合作-合作可行性及合作基础



合作外方:白俄罗斯科学院国家研究和生产协

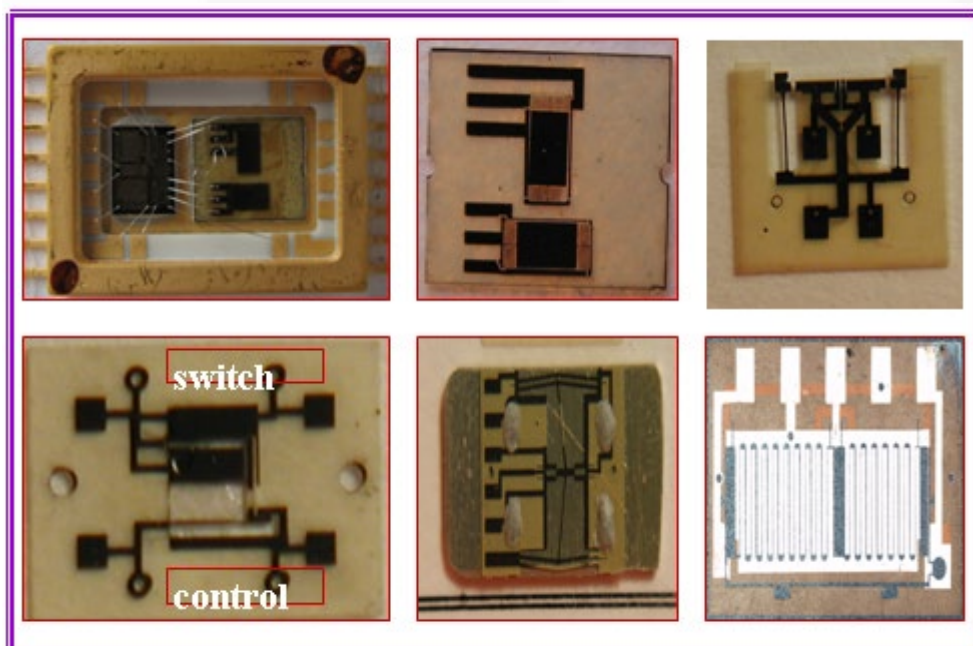
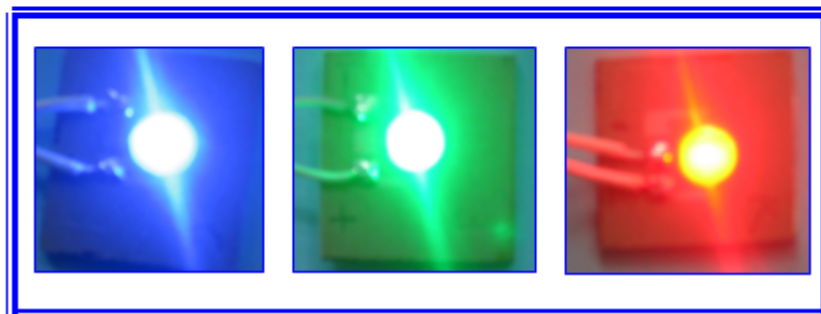
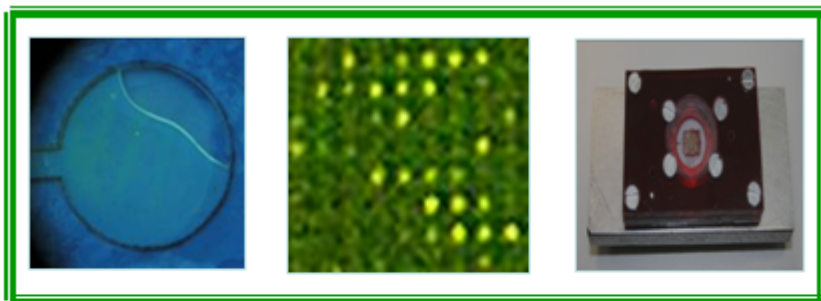
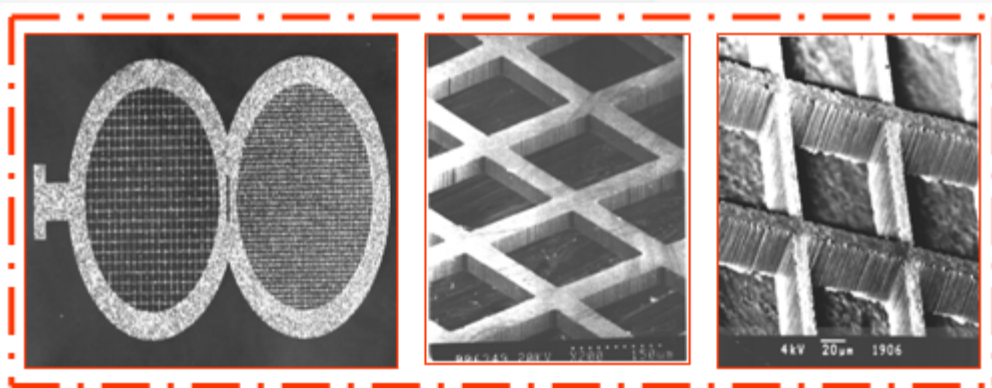
会“光学、光电子和激光技术”中心

生产协会是白俄罗斯著名专业特种电子器件研究开发中心，拥有40余年的陶瓷MEMS制造经验，曾为前苏联的载人航天工程、卫星探测、工业部门提供配套专用传感器，在原位生长 Al_2O_3 陶瓷MEMS技术设计、开发、研究、产业化方面等方面居国际领先地位。

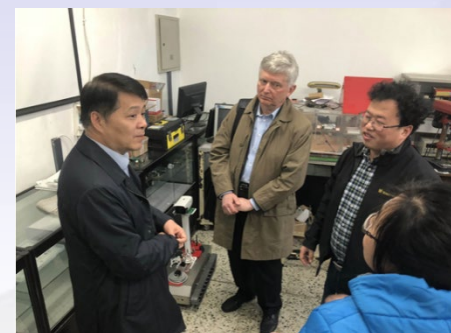
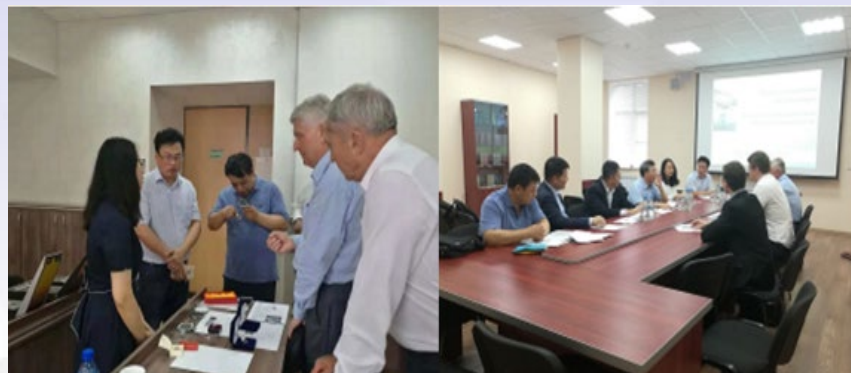
Head of Laboratory, Professor Mukhurov
Nikolai Ivanovich



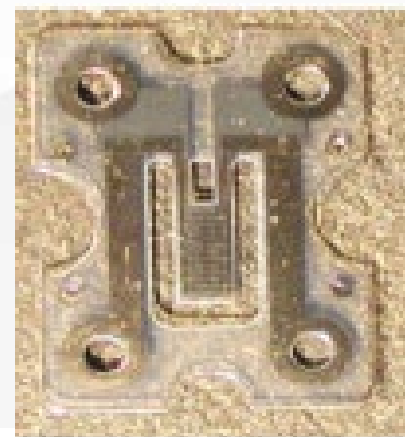
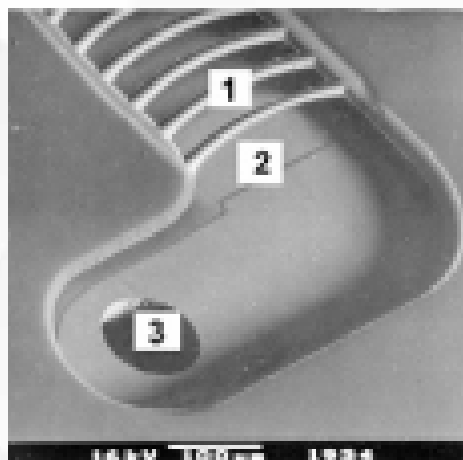
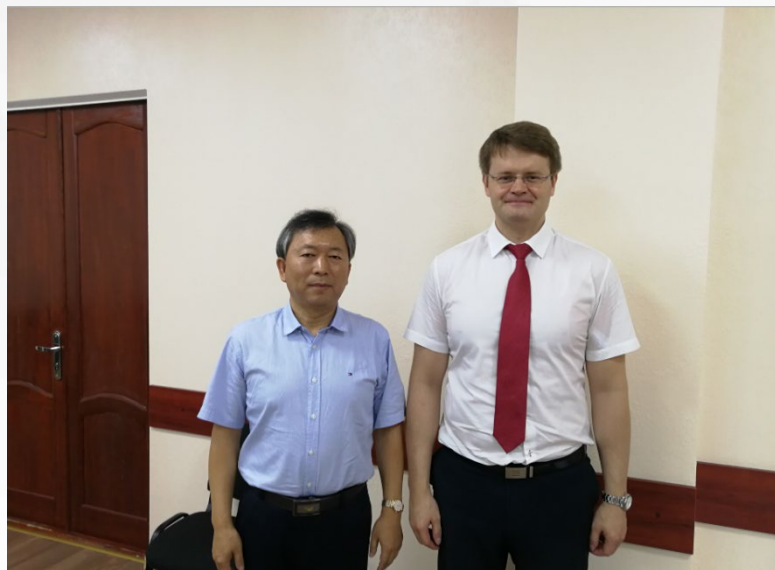
原位生长、成膜技术、晶型转变、湿法刻蚀、膜剥离



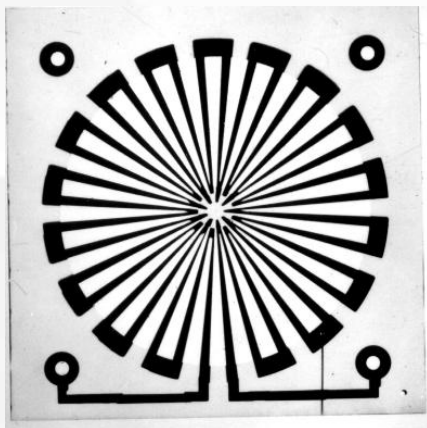
国际合作



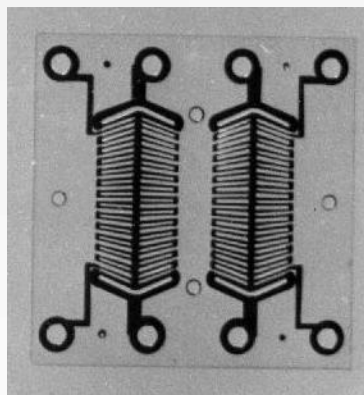
中白互访及工作照片



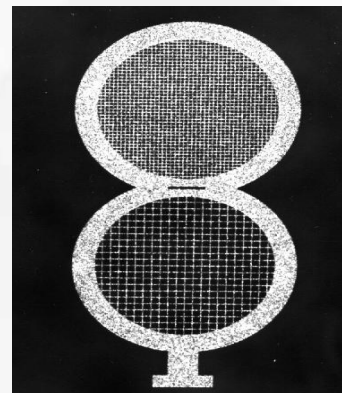
知识拓展-白俄罗斯三氧化二铝材料MEMS技术



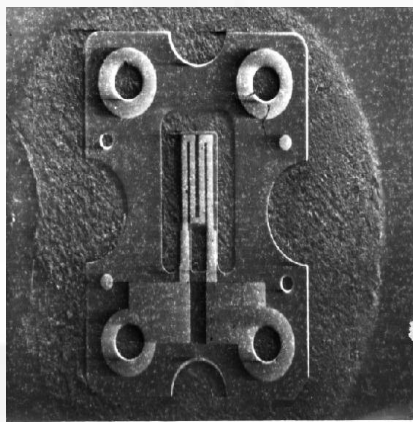
激光温度检测



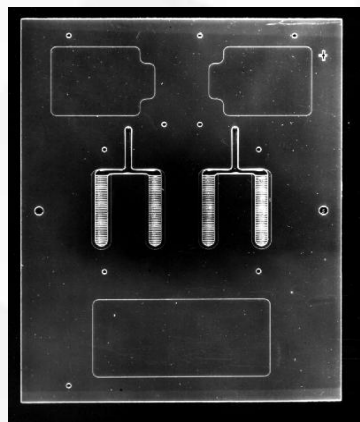
热能检测



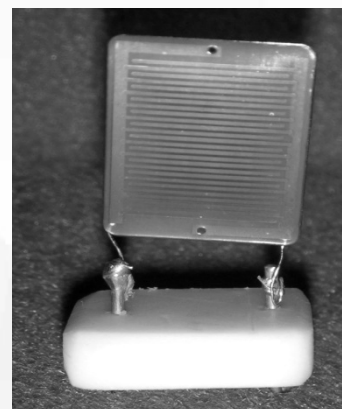
生物过滤网



气体MEMS



电子开关



湿度MEMS

