

现代传感器原理及应用



智能科学与工程学院

陈世同

课程介绍

学时：40，其中讲授 24 学时，实验 8 学时，研讨 8 学时

序号	考核项	成绩占比
1	实验成绩	呼吸传感器实验（10%） 电导率传感器实验（10%）
2	平时成绩	研讨报告（10%） 大作业（10%）
3	期末成绩	笔试（60%）

为什么要学习传感器？

■ 现代信息技术的三大支柱之一

传感器技术（信息采集）

通信技术（信息传输）

计算机技术（信息处理）

在信息系统中分别起到“感官”、“神经”和“大脑”的作用。

■ 现代测量与自动控制的首要环节

传感器是信息采集系统的首要部件，计算机的“五官”。

没有传感器对原始信息进行精确、可靠的捕获和转换，一切测量和控制都是不可能实现的。

为什么要学习传感器？

■ 衡量国家综合实力的重要标志

传感器与传感器技术的发展水平是衡量一个国家综合实力的重要标志，也是判断一个国家科学技术现代化程度与生产水平高低的重要依据。

日本：传感器技术列为计算机、通讯、激光、半导体、超导和传感器等六大核心技术之一。

美国：传感器及信号处理列为对国家安全和经济发展有重要影响的关键技术之一。

欧洲：传感器技术作为优先发展的重点技术。

中国：在国家重点科技项目中，传感器也列在重要位置。

第一章 绪论

1.1传感器的应用

1.2传感器的定义

1.3传感器的分类

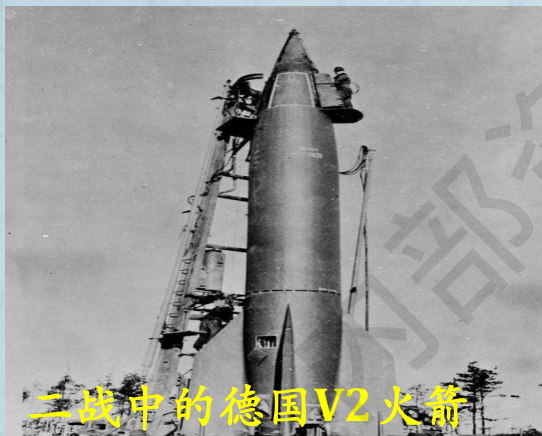
1.4传感器的性能要求

1.5传感器先进材料技术

1.6传感器的设计方法

1.7传感器的制造技术

1.1 传感器的应用--军事领域



1.1 传感器的应用--军事领域

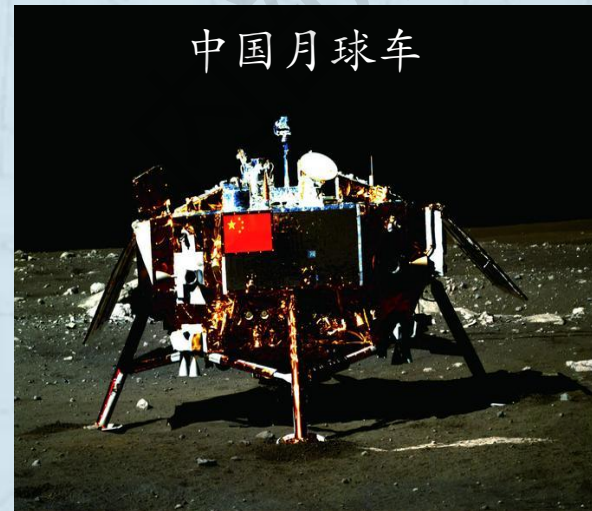
61.04 苏联加加林



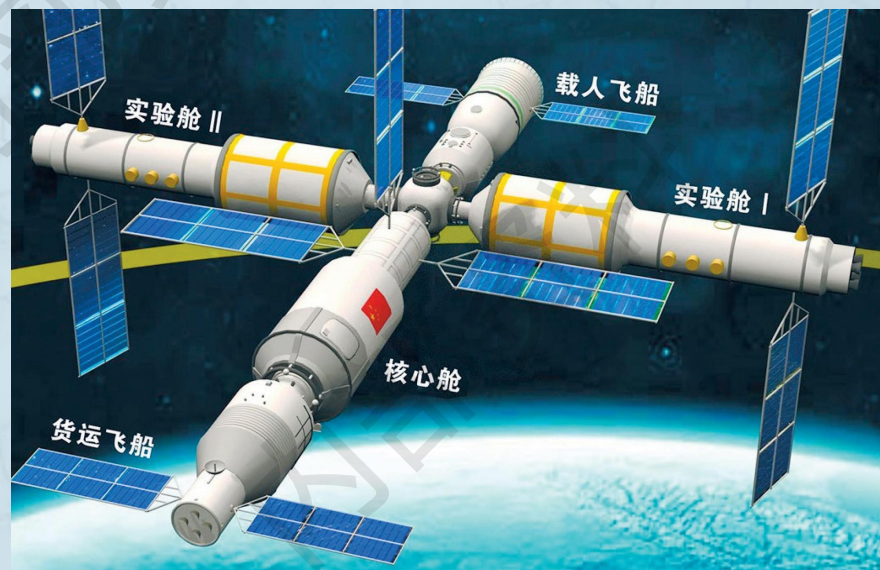
69.07 美国阿姆斯特朗



中国月球车



太空行走



1.1 传感器的应用--军事领域

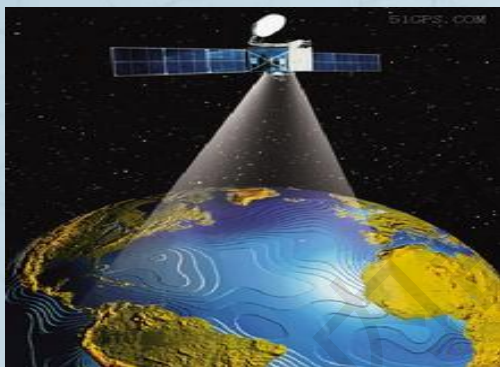
83.里根政府提出：星球大战计划-反弹道导弹防御系统之战略防御计划



实现导弹弹道的助推段、末助推段、中段和再入段分四层拦截。

太空监测系统：探测和发现敌方导弹发射并追踪导弹的飞行轨道。

1.1 传感器的应用--军事领域



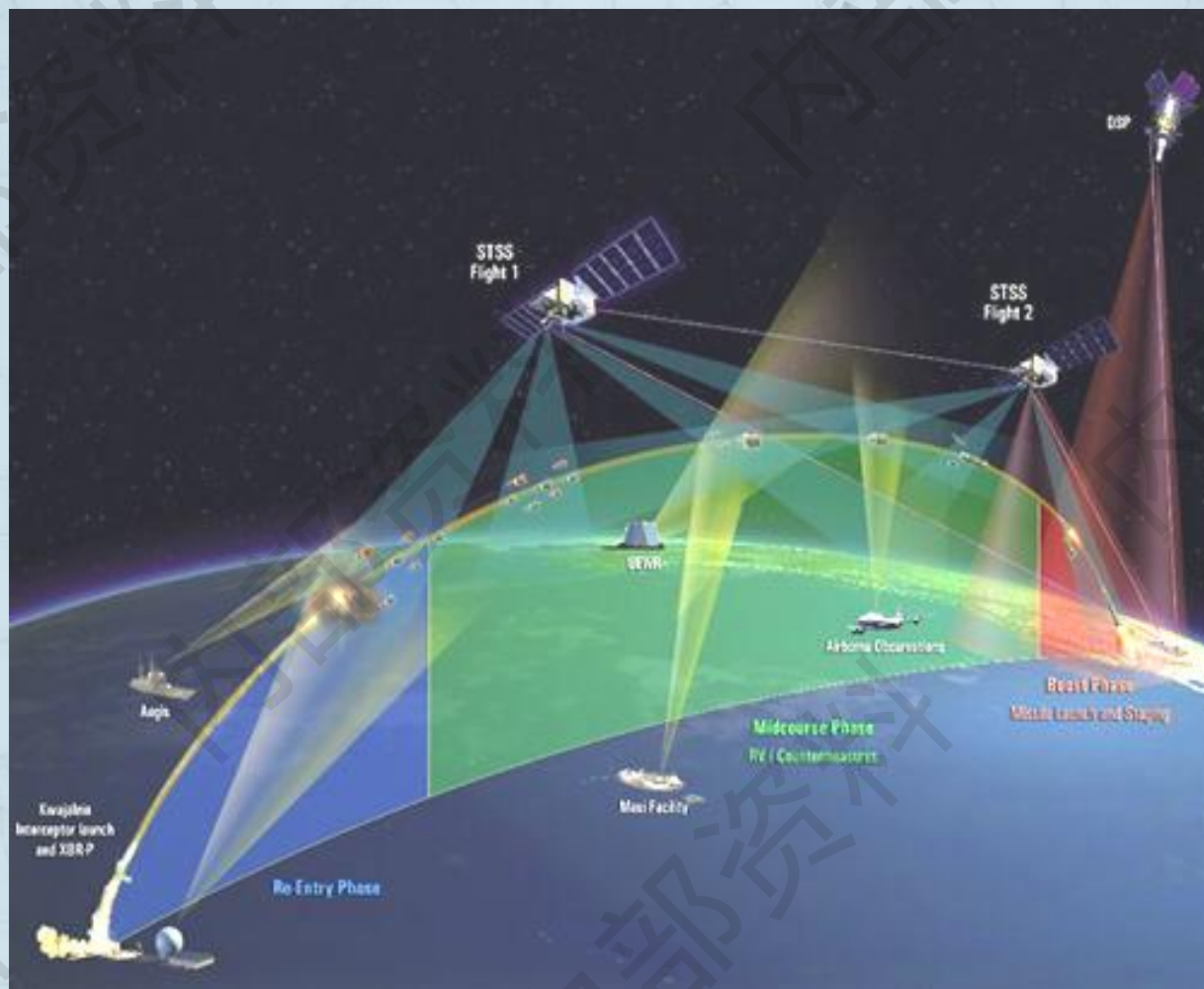
星球大战计划
太空监视系统

雷达

红外传感器

可见光传感器

紫外传感器



1.1 传感器的应用--军事领域

韩国部署萨德-美研制的机动式战区弹道导弹防御系统

2016年9月30日



1.1 传感器的应用--军事领域

马航MH370

2014年3月8日马来西亚航空
239人波音777MH370，由吉隆坡飞往北京

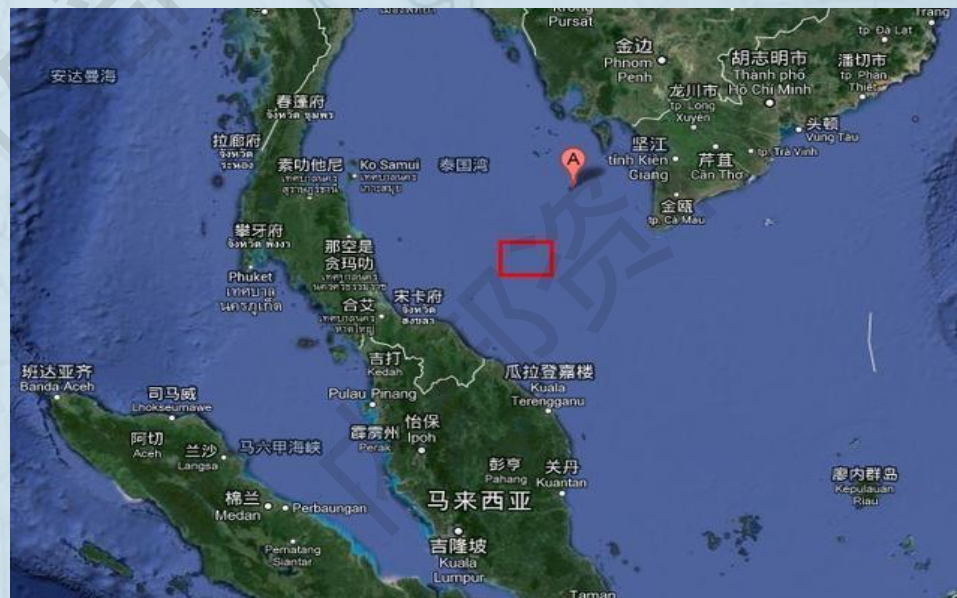


扫描声纳

多波束回声测深仪

声纳影像

拖曳声波定位仪



1.1 传感器的应用--军事领域

蓝鳍金枪鱼

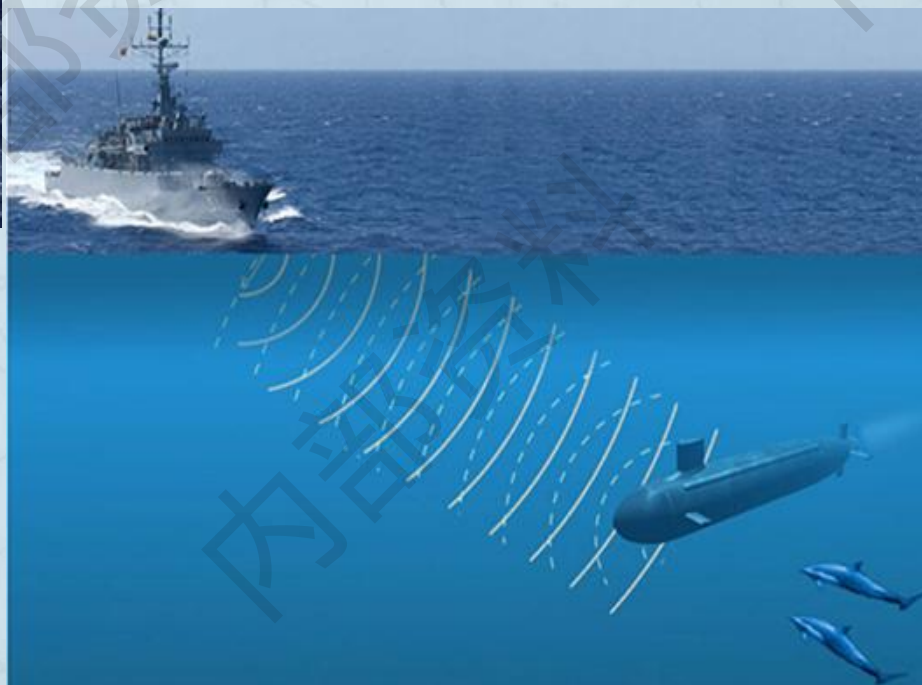


声纳影像

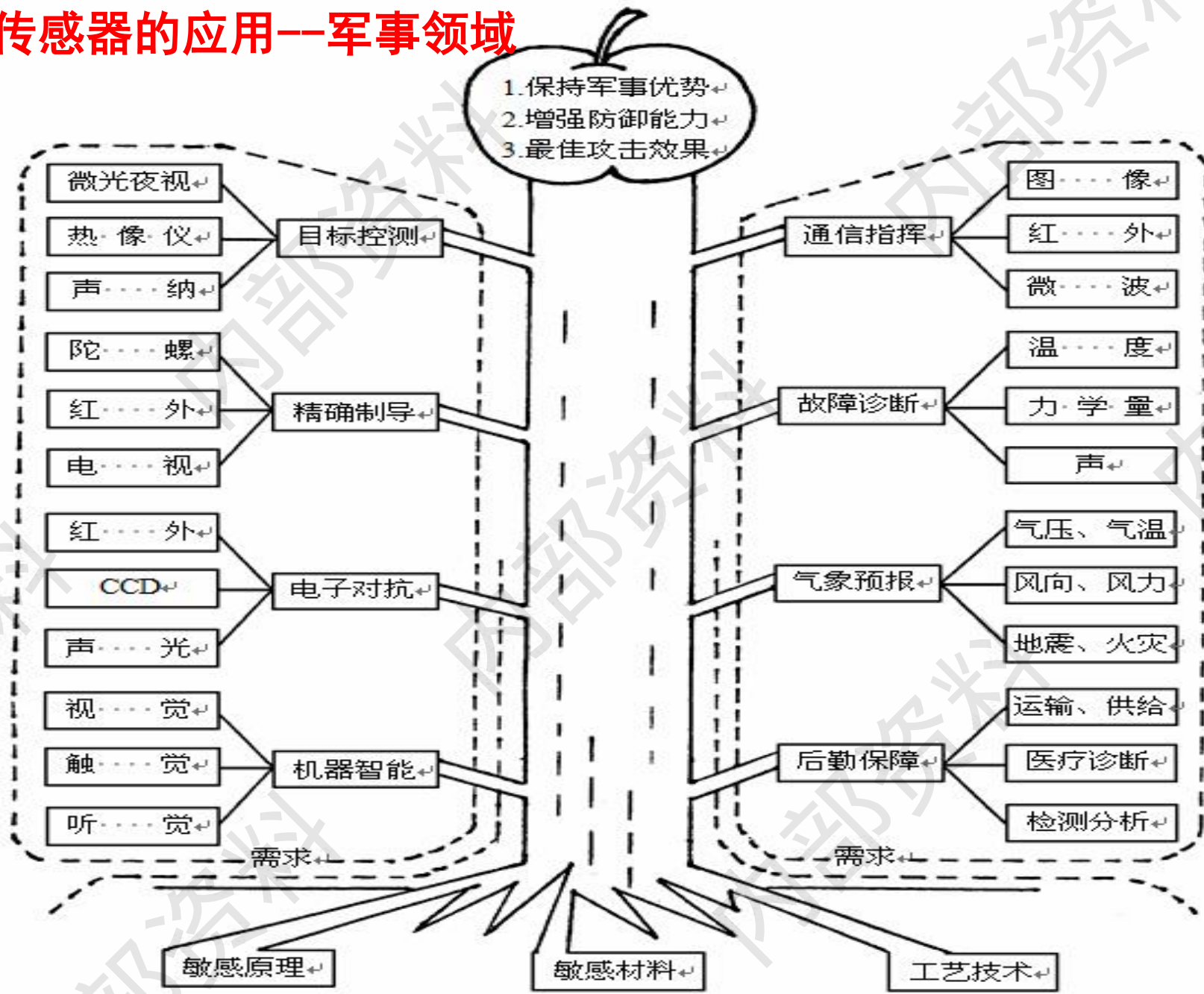
拖曳声波定位仪

扫描声纳

多波束回声测深仪



1.1 传感器的应用--军事领域



1.1 传感器的应用--汽车工业

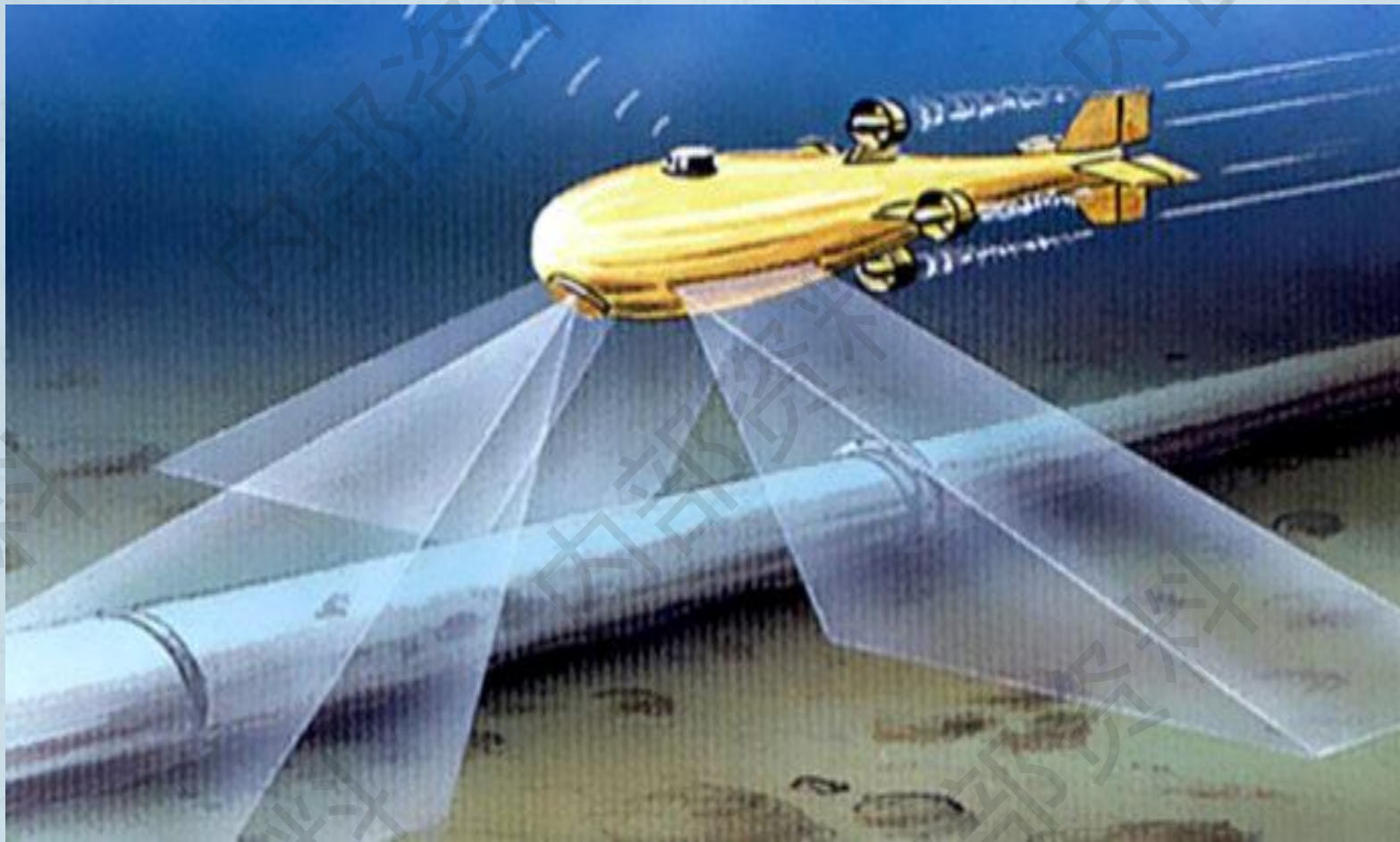


1.1 传感器的应用--海洋开发



深海空间站

1.1 传感器的应用--海洋开发



海洋管道维护

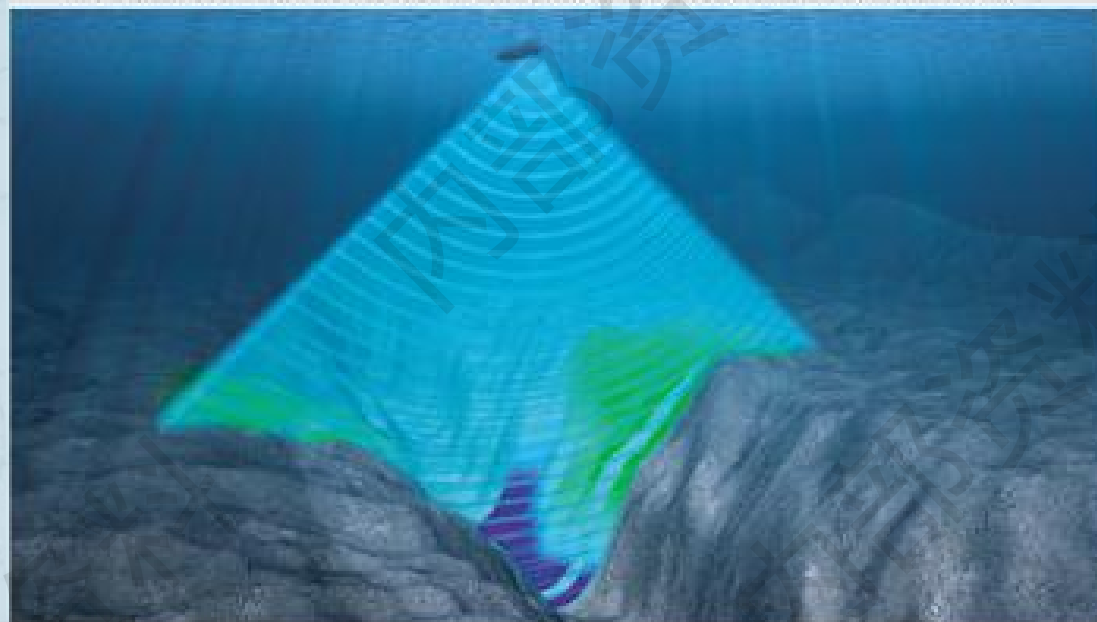
1.1 传感器的应用--海洋测绘

SeaBeam 3012

Full Ocean Depth Multibeam System



12 kHz | 11,000 m Full Ocean Depth Performance | 31,000 m Swath Coverage | Swept Beam™



海底地形测量

1.1 传感器的应用--机器人

第一代机器人：不具有感知和反馈，示教再现型

第二代机器人：对外界环境有一定感知能力，具有视觉、触觉、听觉等功能。

第三代机器人：智能机器人，具有感觉能力，有记忆、推理和决策的能力，有与外部世界——对象、环境和人相适应、相协调的工作机能。

为了检测作业对象、环境与机器人的关系，在机器人上安装了触觉、视觉、力觉、接近觉、超声波等传感器，进行定位和控制，实现类似人类感知作用。

机器人传感器是指机器人对内外部环境感知的物理量变换为电量输出的装置。

1.1 传感器的应用--机器人

机器人传感器的分类：

a. 内部传感器：

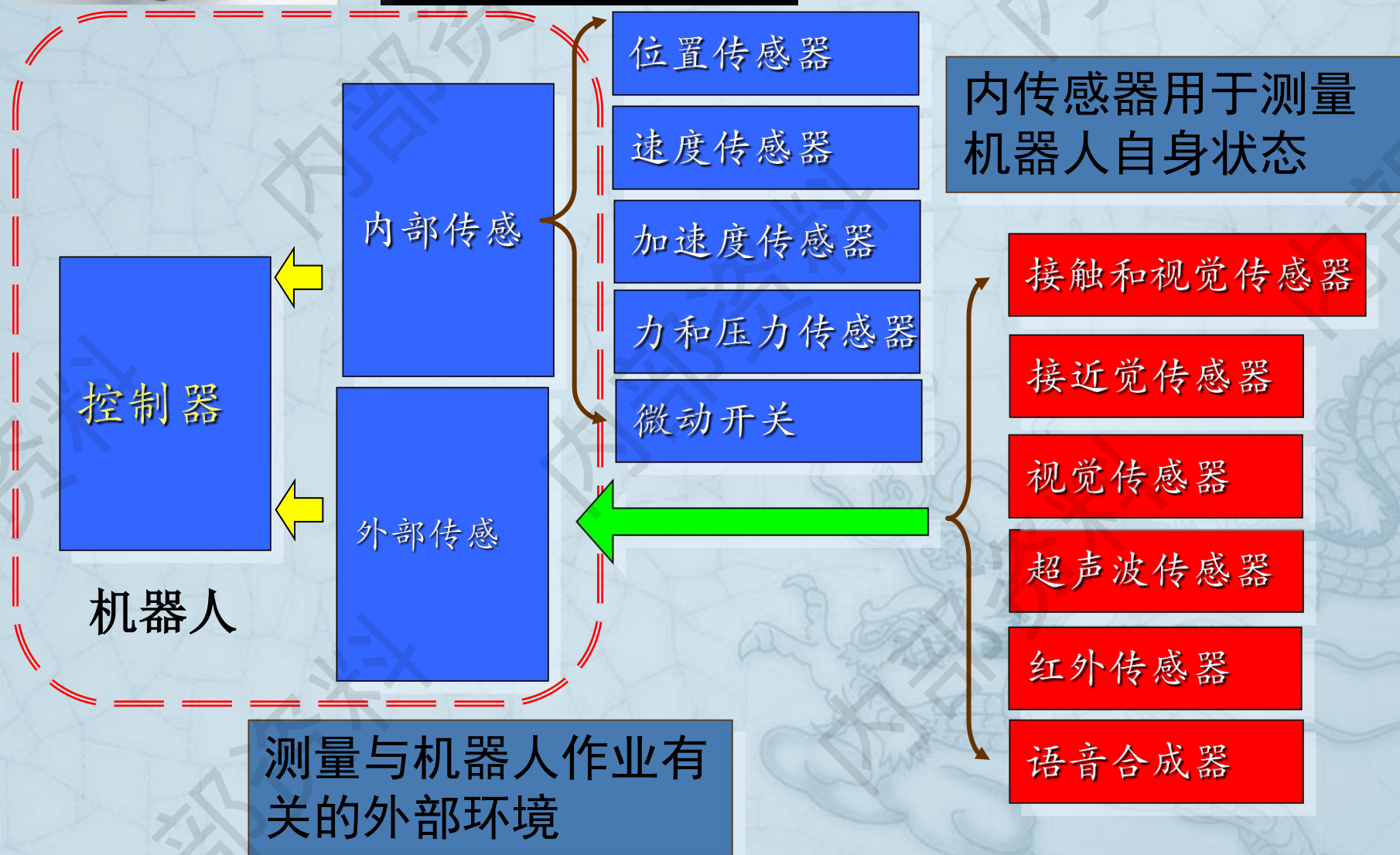
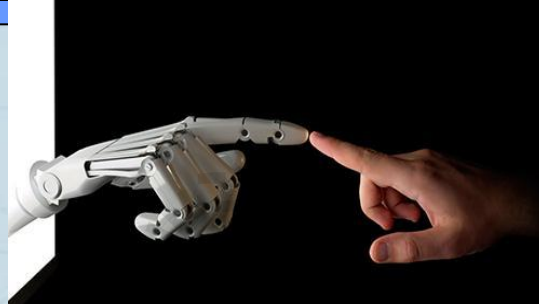
主要感知与机器人自身参数相关的内部信息，如位移、速度、加速度等。

主要有位置传感器、速度和加速度传感器、陀螺等。

b. 外部传感器：

主要感知本体以外的外界物理信息，如障碍物的位置、形状、颜色、距离、接触受力等。主要包括视觉传感器、听觉传感器、触觉传感器、力觉传感器、滑觉传感器、陀螺传感器、接近觉传感器、距离传感器、嗅觉传感器、味觉传感器以及生物传感器。





1.1 传感器的应用--机器人

机器人视觉传感器

原理：视觉传感器主要采用模拟摄像机或数码摄像机获取来环境图像信息。对摄像机获取的二维图像进行数字化后就可利用计算机感知机器人所处的三维环境。

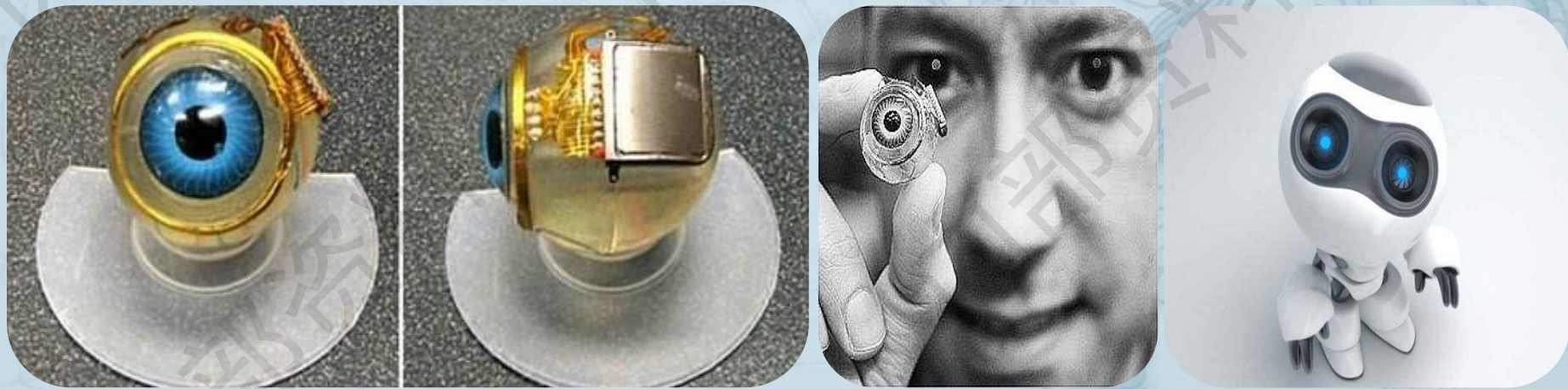
应用：通过对视觉传感器获取的图像信息进行处理，可以感知环境中物体的轮廓、形状、颜色、还可以实现运动检测、深度测量、相对定位、导航、环境或特定物体的三维建模等。

分类：光导管摄像机、数码摄像机。



1.1 传感器的应用--机器人

- 1, 日本东北大学教授小柳光正与准教授田中彻的研究小组, 正在研究模拟生物眼睛的视觉传感器, 即人工视网膜芯片。其目标是用几十mW的极低功率实现相当于1万fps的超高速影响。
- 2, 日本广岛大学石井教授与东京大学石川正俊教授所领导的研究小组用现有技术开发阶段性执行的图像数据处理系统。具有高精度且超高帧速率, 而且可以实时, 处理信息。
- 3, 美国加州大学研制了一款具有“透视眼”功能的机器人, 可以观察发现墙壁内部的物体。该技术可用于寻找困陷在建筑物中的伤员, 或者监控家中的老人。



1.1 传感器的应用--机器人

机器人听觉传感器：

原理：声音识别是人工智能的重要研究课题，也是智能机器人的重要研究内容。机器人听觉传感器可以感知环境中的声音、超声波、次声波等信息。

应用：机器人对声波信号的识别可以用于防治次声污染、人机语音交互、自然灾害预测等多个领域。

分类：无噪声电声传感器、驻极体电容式传声器、动圈式传声器、带式传声器、光纤型声音传感器。



1.1 传感器的应用--机器人

机器人触觉传感器：

原理：触觉传感器是当机器人与环境中物体接触时给出接触信号，通过对触觉的感知机器人可以确认是否与环境中的物体接触，包括压觉、力觉、冷热觉、质觉（硬度）等息。

应用：简单的接触传感器可以使机器人对碰撞、接触等作出反应，复杂的触觉传感器使机器人不仅了解是否与物体接触、而且可以获取接触力的大小。

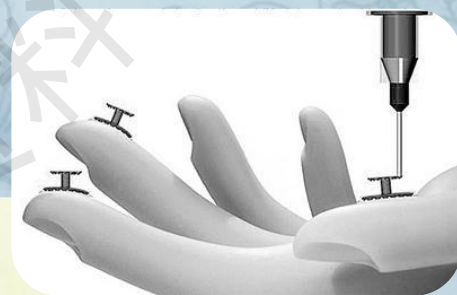
分类：简单的接触传感器、电阻式接触传感器、电容式触觉传感器、电化学触觉传感器、光学触觉传感器。



1.1 传感器的应用--机器人

机器人力觉传感器：

- 1, 多维力传感器指的是一种能够同时测量两个方向以上力及力矩分量的力传感器, 在笛卡尔坐标系中力和力矩可以各自分解为三个分量, 因此, 多维力最完整的形式是六维力/力矩传感器, 即能够同时测量三个力分量和三个力矩分量的传感器, 目前广泛使用的多维力传感器就是这种传感器。
- 2, 日本信号株式会社推出了基于微机电系统 (MEMS) 技术的超小型六轴力觉传感器。其采用该公司研发的电磁驱动式MEMS光扫描仪"ECO SCAN"的技术经验, 主要用于机器人和计量测量仪器领域。该六轴力觉传感器利用半导体的压电电阻效应来检测应力。



1.1 传感器的应用--机器人

机器人滑觉传感器：

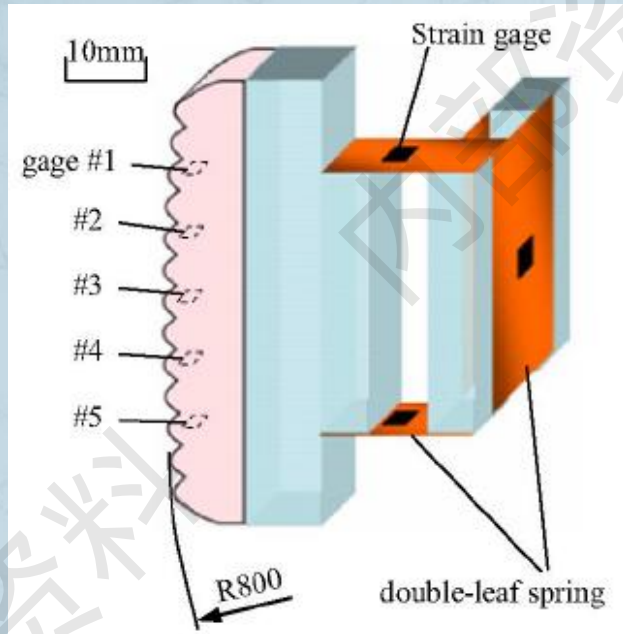
原理：为了在抓握物体时确定一个适当的握力值，需要实时检测接触面的相对滑动，然后判断握力，在不损伤物体的情况下逐渐增加力量，滑觉检测功能是实现机器人柔性抓握的必备条件。通过滑觉传感器可实现识别功能，对被抓物体进行表面粗糙度和硬度的判断。

应用：滑觉传感器可用来检测机器人与抓握对象间滑移程度的传感器。

分类：无方向性滑觉传感器、单方向性滑觉传感器、全方向性滑觉传感器（球形）。



1.1 传感器的应用--机器人

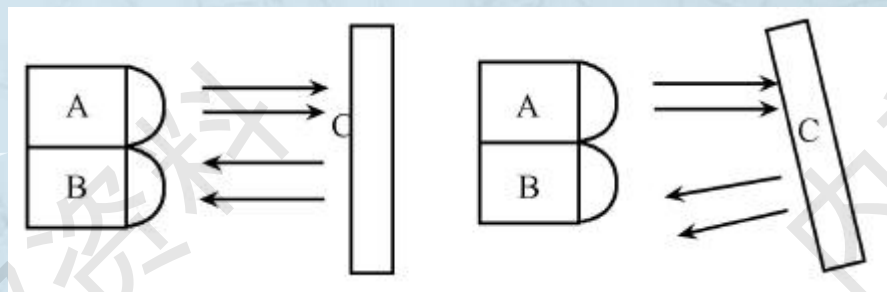
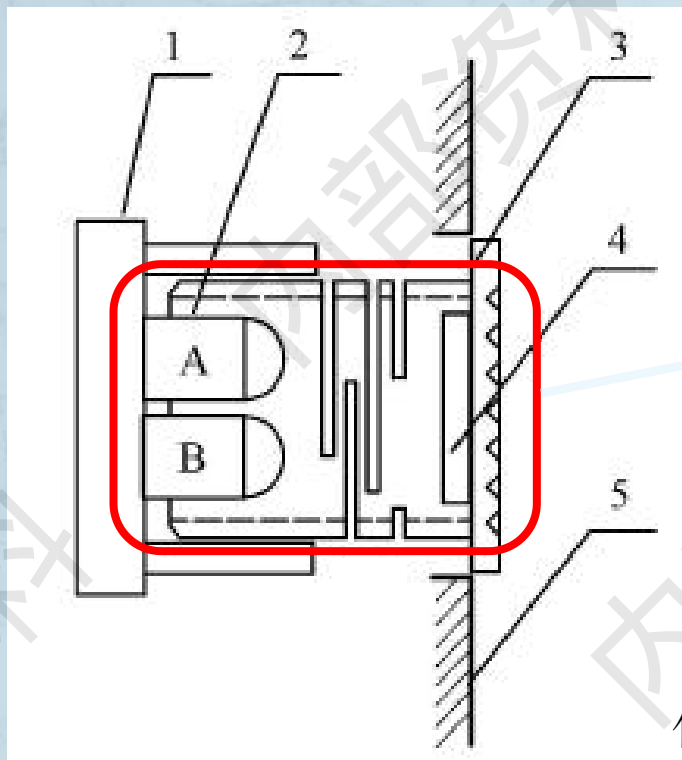


在对人手指垫有限元分析的基础上，研制出一种模仿人抓取物体特征的滑觉传感器。

传感器弹性接触表面安装有多个应变计，用于检测滑动时凸脊的应变速度，通过检测边缘初始滑动时的振动信号判断物体有无发生整体滑动趋势。

在未知物体重量和表面摩擦系数的情况下实现了对物体成功抓取。

1.1 传感器的应用--机器人



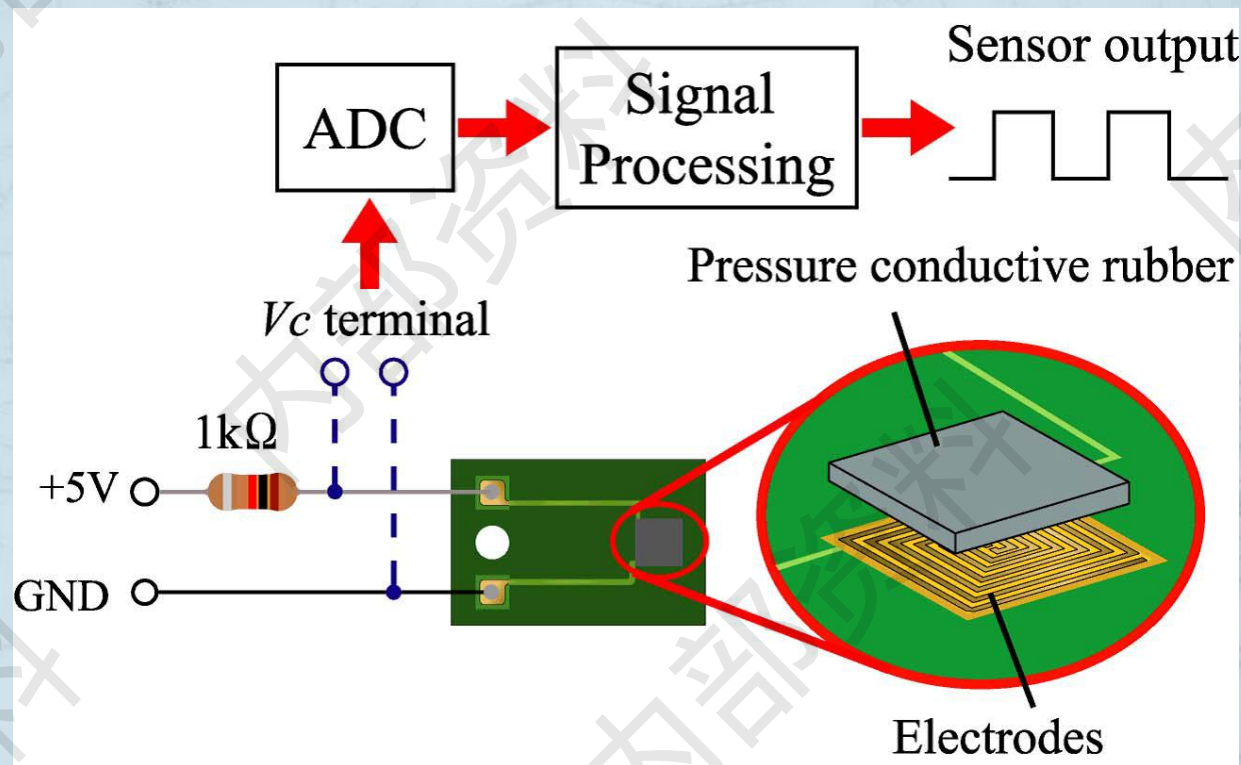
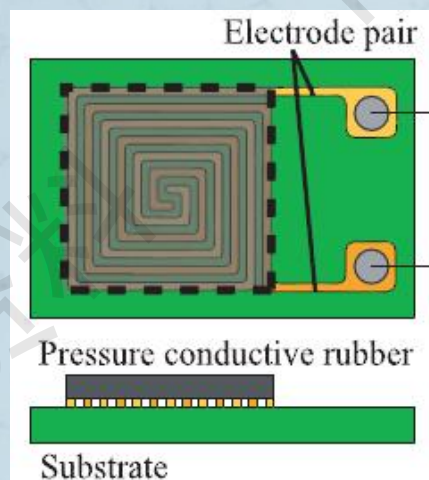
传感器基本结构

1.基座 2.光电器件 3.滑觉触头 4.反射镜面 5.夹持工作面

天津大学研制的基于光电原理的机器人用滑觉传感器，通过把物理的滑动信号转变为光信号，利用光电元件把光信号转变为电信号进行检测获取物体滑动信息。

1.1 传感器的应用--机器人

力敏导电硅橡胶是一种性能优良的柔性触滑觉传感器材料，是以导电材料为填充粒子，基体采用胶体的一种高分子复合材料。



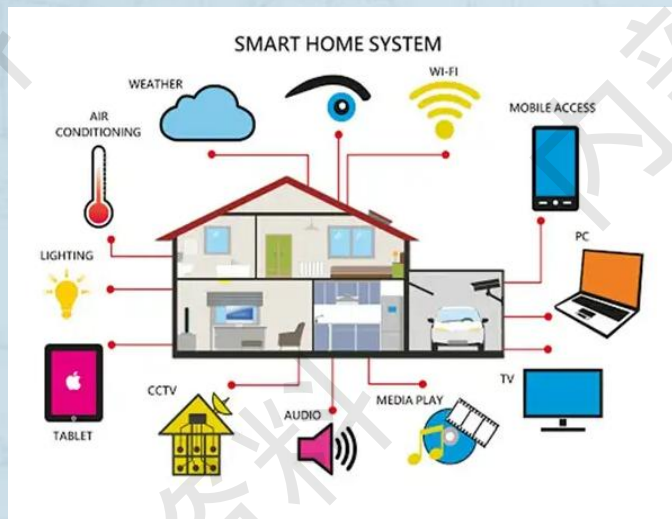
1.1 传感器的应用--消费电子



无人机



AR & VR



智能家居



扫地机器人

1.1 传感器的应用--智慧医疗



血压计，血糖仪，健身追踪仪，心率检测仪等

1.2 传感器的定义

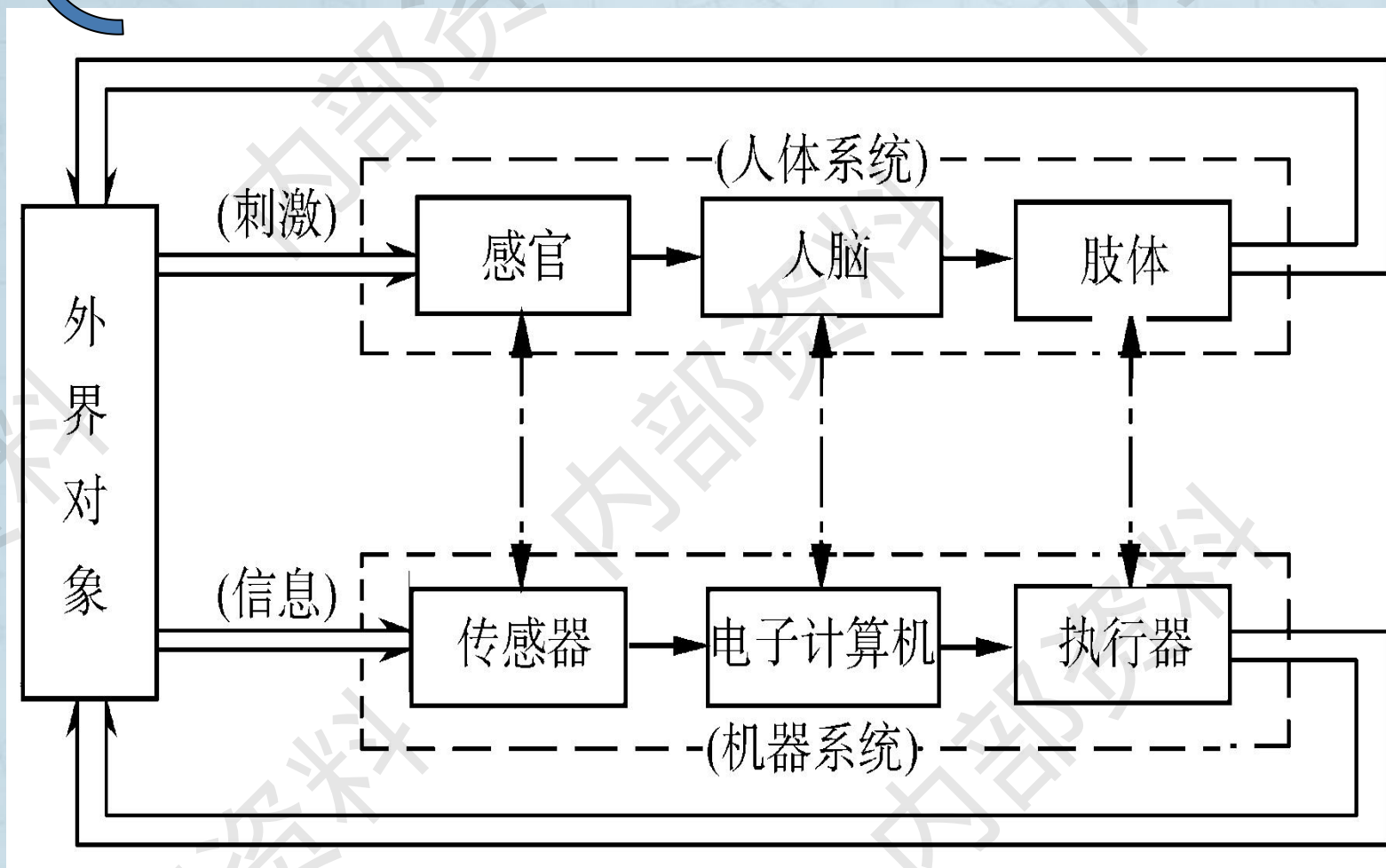
传感器

最早是来自“感觉”一词。人用眼睛看，可以感觉到物体的形状、大小和颜色；用耳朵听，可以感觉到声音；用鼻子嗅，可以感觉到气味。这种视觉、听觉、嗅觉、味觉和触觉，是人感觉外界刺激所必须具备的感官，称为“五官”，它们就是天然的传感器。

各种高技术机器及家用电器的水平高低的分界就在于其传感器的数量和水平不同。

1.2 传感器的定义

掌握：



1.2 传感器的定义

传感器的定义

《过程检测控制仪表术语》传感器定义是：“借助于检测元件接受物理量形式的信息，并按一定规律将它转换成同样或别种物理量形式的信息仪表”。



掌握

国标GB/T7665-1987《传感器通用术语》中，传感器的定义为：

“能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成。

美国仪器仪表协会(ISA)的传感器定义是：传感器是把被测量变换为有用信号的一种装置。它包括敏感元件、变换电路以及把这些元件和电路组合在一起的机构。

1.3 传感器的分类



分类方法	传感器的种类
按效应分类	物理传感器 化学传感器 生物传感器等
按原理分类	应变式、电容式、电感式、电磁式、压电式、热电式、光电式传感器等

1.4 传感器的性能要求

掌握：

1. 灵敏度高、线性好
2. 输出信号信噪比高
3. 滞后、漂移小
4. 特性复现性好，有互换性
5. 动态特性好
6. 对测量对象影响小，负载效应较低
7. 寿命长、抗恶劣环境、体积小、功耗低、等等

1.5 传感器先进材料技术

封装材料



压电陶瓷



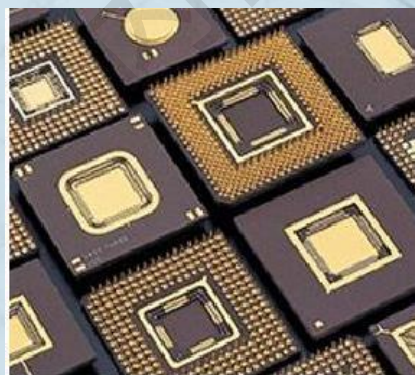
金属材料



半导体陶瓷



硅锗砷化镓



结构陶瓷



1.5 传感器先进材料技术

材料—元素周期表

Atomic number

Symbol

Atomic weight

Metal

Semimetal

Nonmetal

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H 1.008	2 He 4.003																
3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18
11 Na 22.99	12 Mg 24.31											13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95
19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.61	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc 98.91	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3
55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	71 Lu 175.0	72 Hf 178.5	73 Ta 180.9	74 W 183.8	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.1	79 Au 197.0	80 Hg 200.6	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po 209.0	85 At 210.0	86 Rn 222.0
87 Fr 223.0	88 Ra 226.0	103 Lr 262.1	104 Rf 261.1	105 Db 262.1	106 Sg 263.1	107 Bh 264.1	108 Hs 265.1	109 Mt 268	110 Uun 269	111 Uuu 272	112 Uub 277	113 Uut	114 Uuq 289	115 Uup	116 Uuh 289	117 Uus	118 Uuo 293
		57 La 138.9	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm 146.9	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0		
		89 Ac 227.0	90 Th 232.0	91 Pa 231.0	92 U 238.0	93 Np 237.0	94 Pu 244.1	95 Am 243.1	96 Cm 247.1	97 Bk 247.1	98 Cf 251.1	99 Es 252.0	100 Fm 257.1	101 Md 258.1	102 No 259.1		

(c)1998
Kremer Paul

半金属大都是半导体 si—SiC AlN GeAs C第三代
电阻率介于金属 ($10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下) 和非金属 ($10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上)

1.5 传感器先进材料技术



半导体

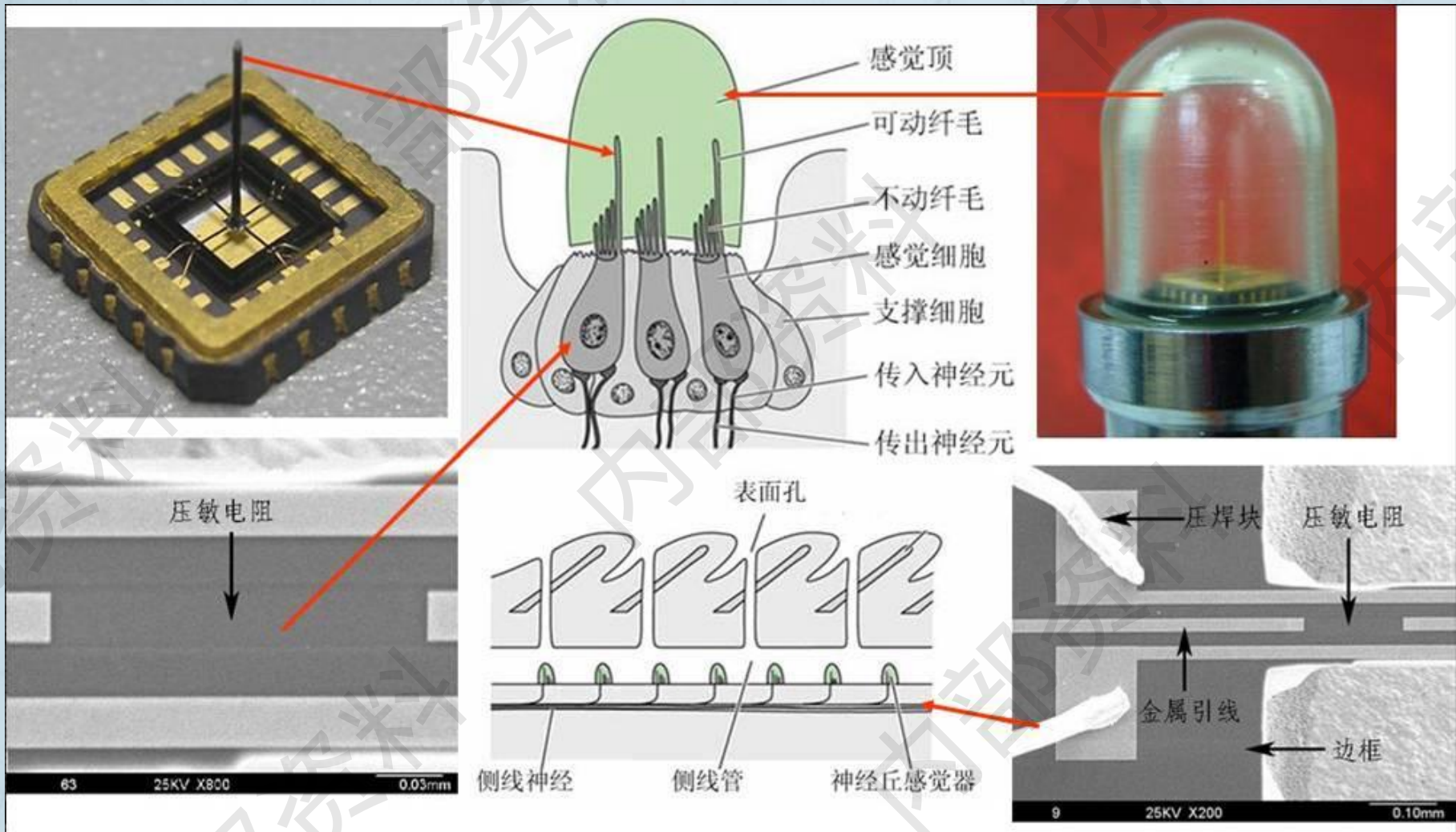


蓝宝石



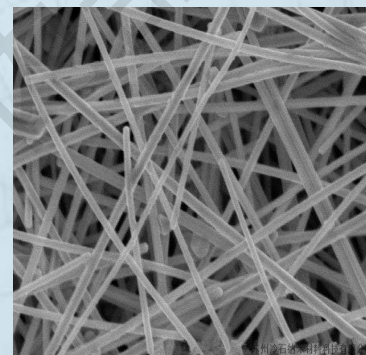
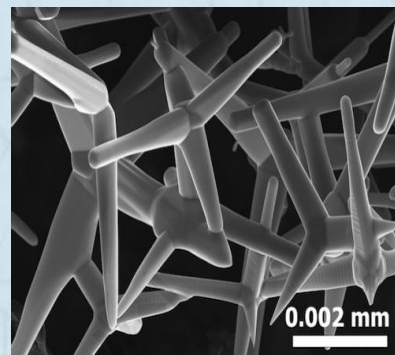
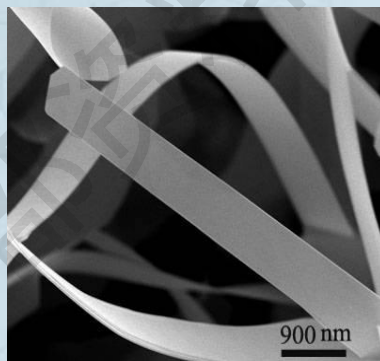
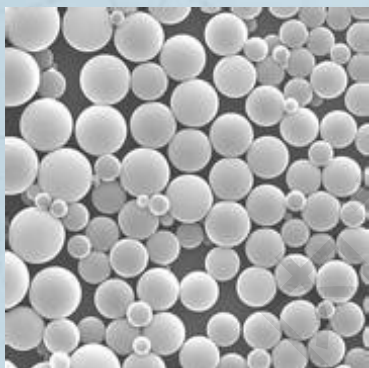
1.5 传感器先进材料技术

MEMS矢量水听器研究

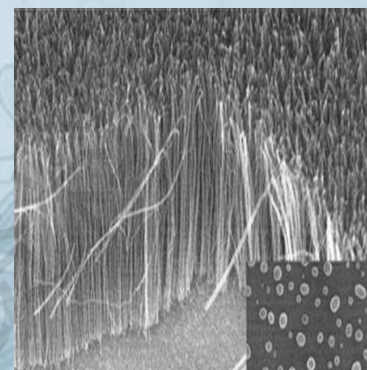
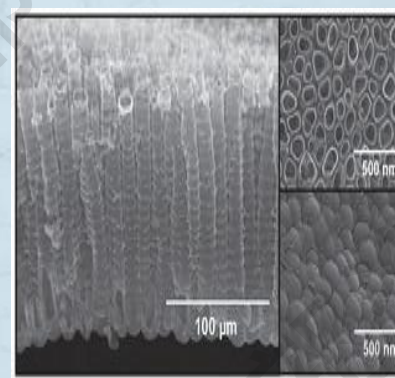
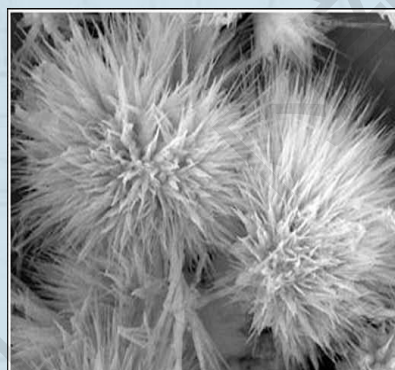
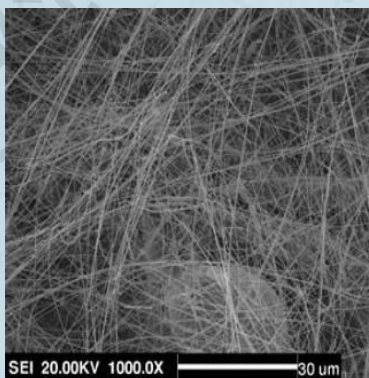


1.5 传感器先进材料技术

传感器先进材料技术-纳米材料

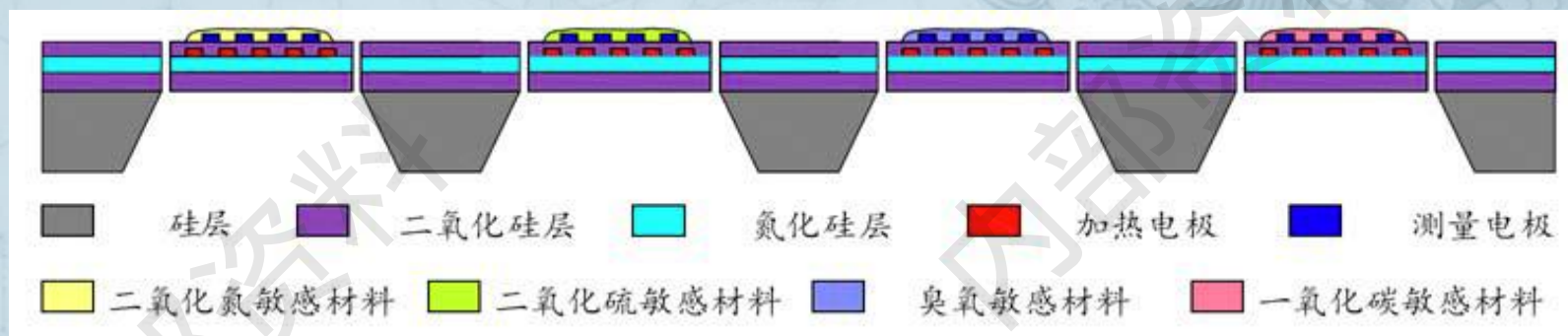
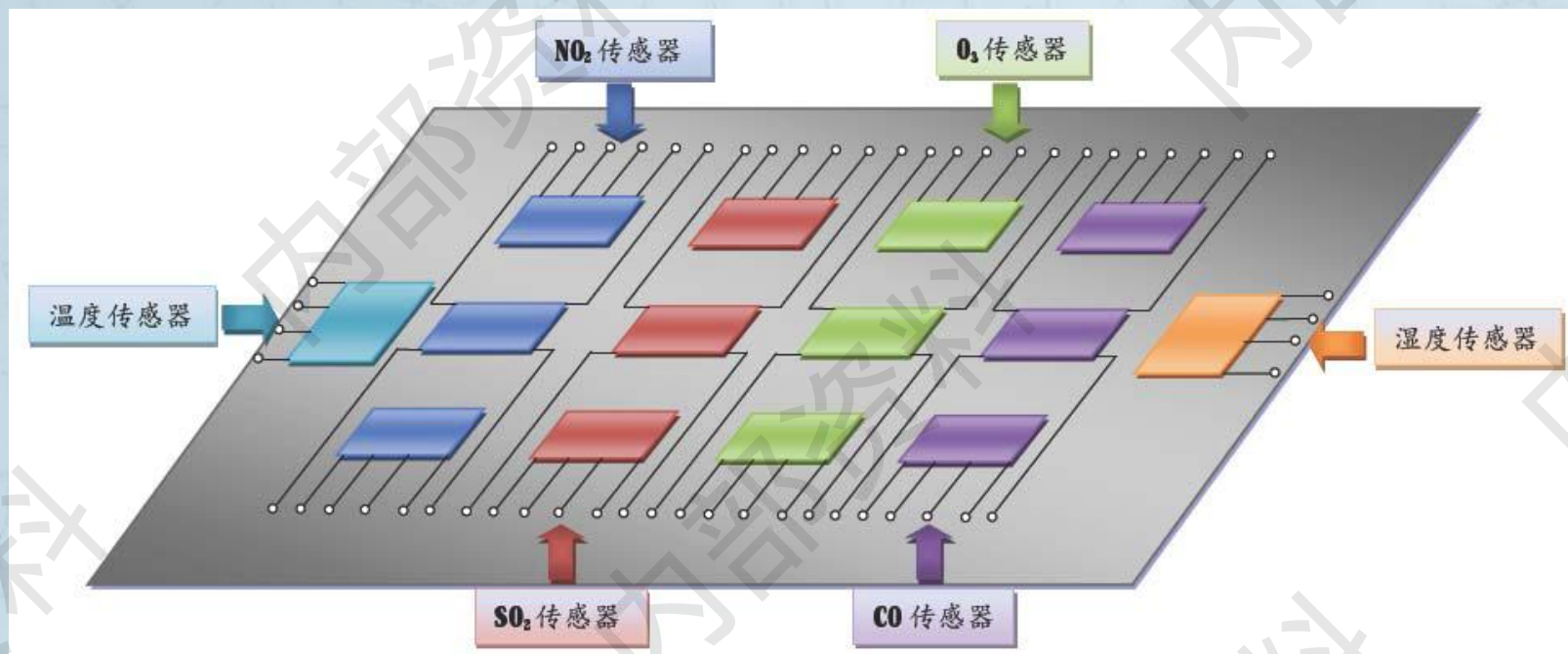


表面效应、小尺寸效应、量子尺寸效应、宏观量子隧道效应



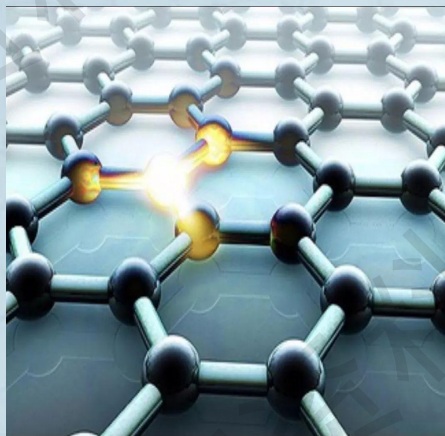
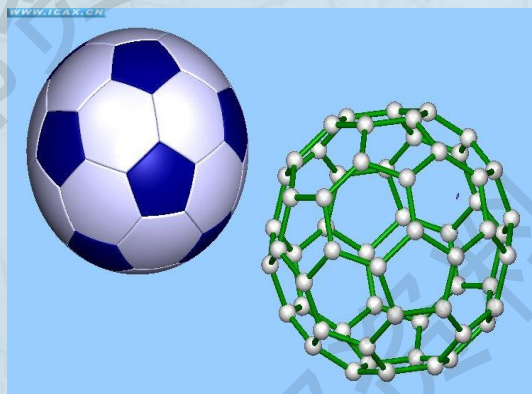
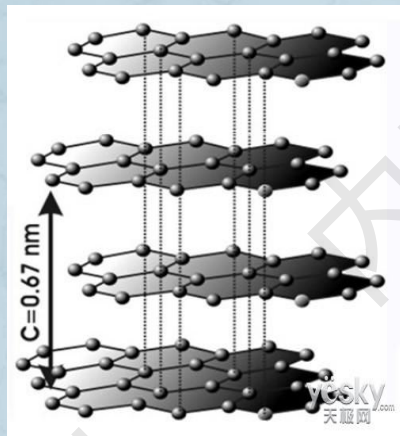
1.5 传感器先进材料技术

纳米气体传感器

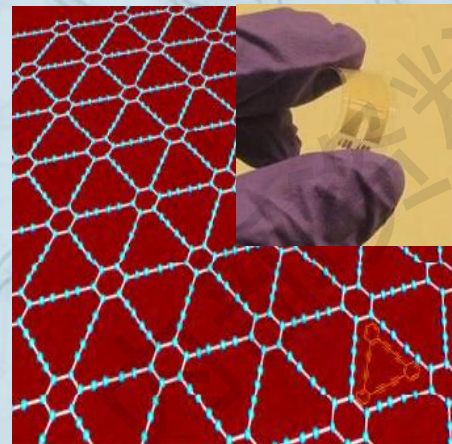


1.5 传感器先进材料技术

碳素材料（近10年火热材料）



石墨烯是碳原子紧密堆积成单层二维蜂窝状晶格结构的新材料。石墨烯具有优异的光学、电学、力学、磁学特性，具有重要的应用前景

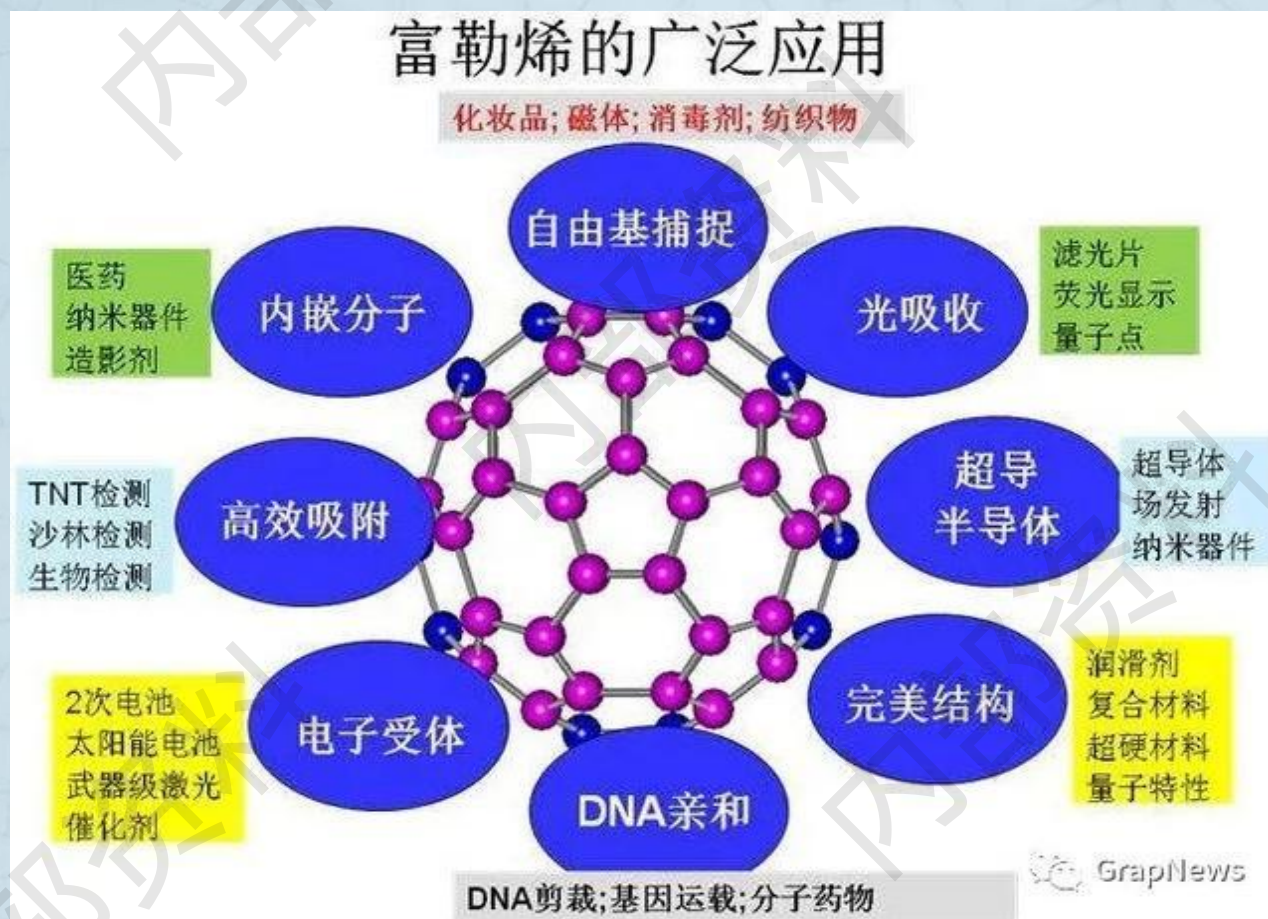


石墨烯具有sp、sp²杂化态碳同素异形体-碳碳三键-二炔碳

1.5 传感器先进材料技术

1、富勒烯

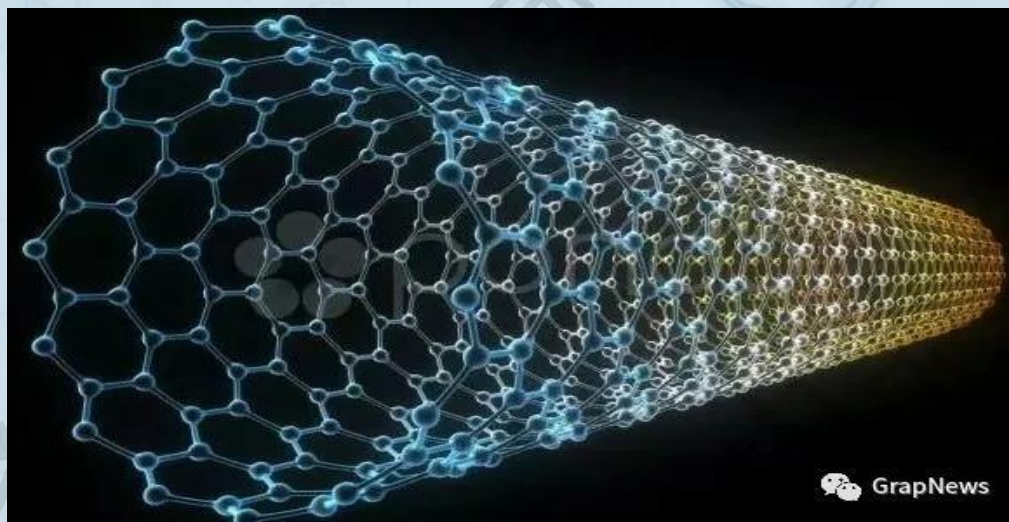
以C60为代表的富勒烯是空心球形构型，C60是由12个正五边形和20个正六边形组成的三十二面，像一个足球。



1.5 传感器先进材料技术

2、碳纳米管

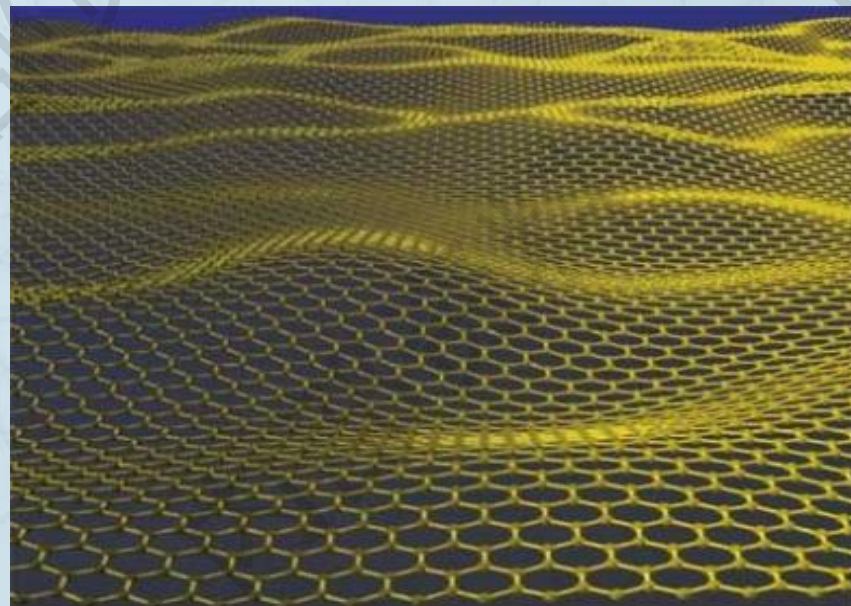
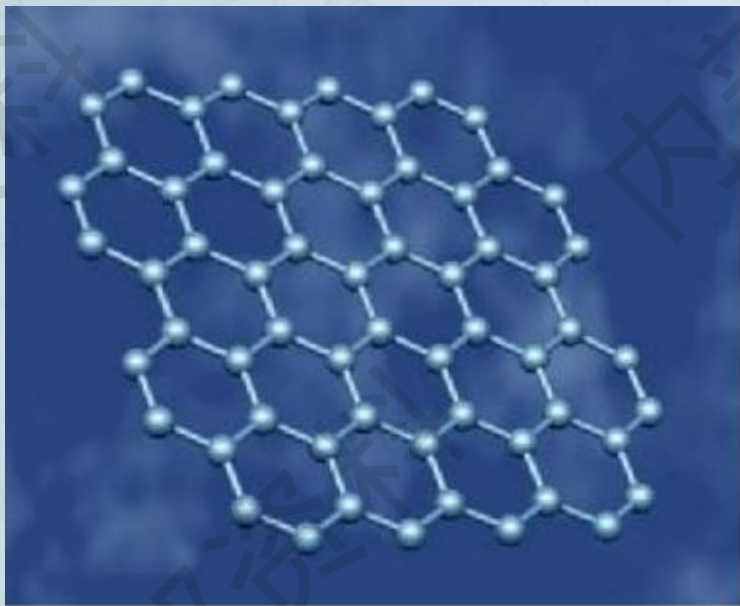
碳纳米管是一种具有特殊结构（径向尺寸为纳米级，轴向尺寸为微米级，管子两端基本上都封口）的一维量子材料，可看作是由片层结构的石墨卷成的无缝中空的纳米级同轴圆柱体，两端由富勒烯半球封成，碳纳米管被称为是21世纪最有前途的一维纳米材料。



1.5 传感器先进材料技术

3、石墨/石墨烯

石墨具有层状晶体结构。一个碳原子周围只有3个碳原子与其相连，碳与碳组成了六边形的形状，无限多的六边形组成了一层。层与层之间联系力非常弱，而层内3个碳原子联系很牢固。石墨是由一层层以蜂窝状有序排列的平面碳原子堆叠而形成的，当把石墨片剥成单层之后，这种只有一个碳原子厚度的单层就是石墨烯。



1.5 传感器先进材料技术

3、石墨/石墨烯

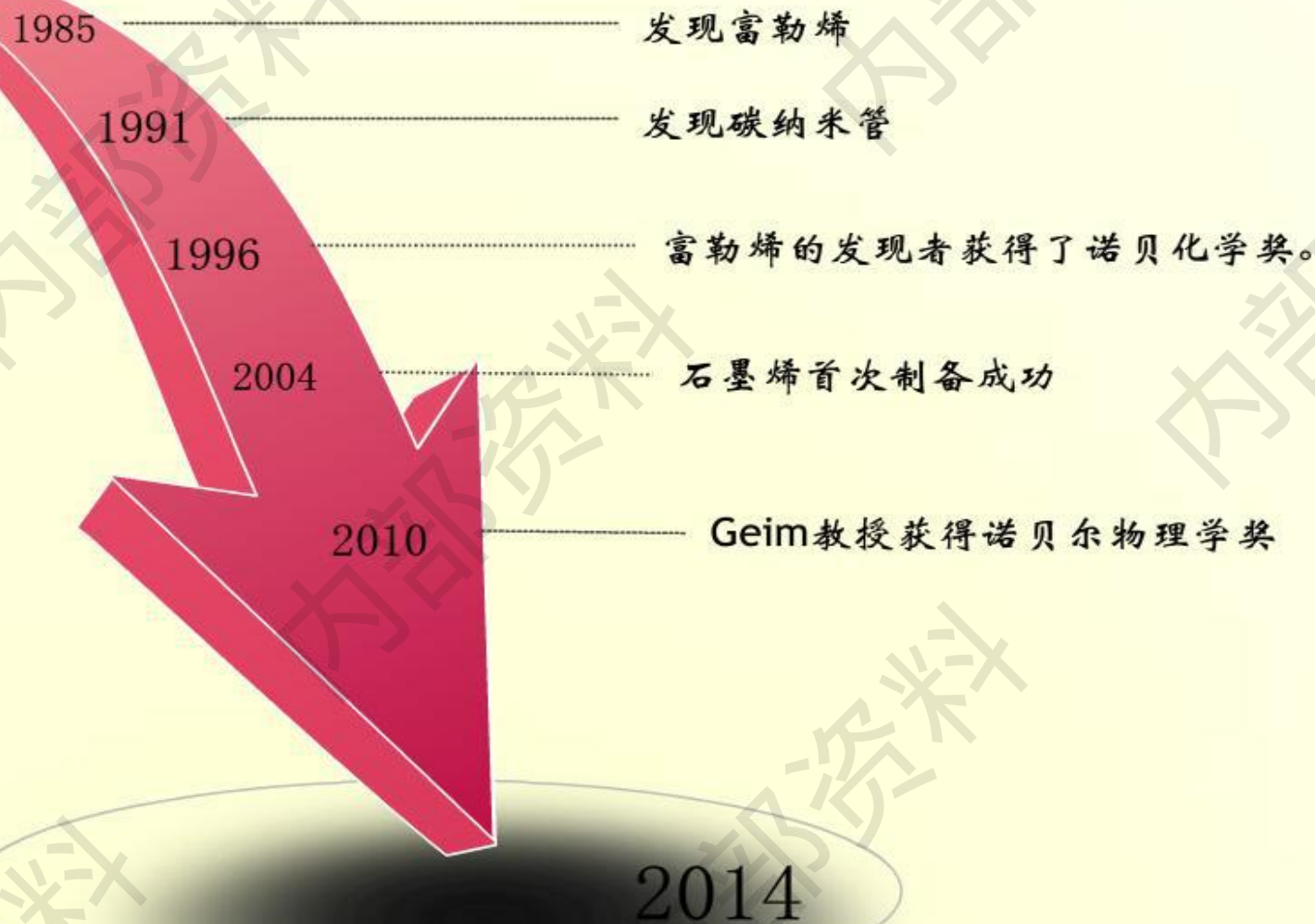
石墨烯狭义上指单层石墨，厚度为0.335nm，仅有一层碳原子。但实际上，10层以内的石墨结构也可称作石墨烯，而10层以上的则被称为石墨薄膜。

4、石墨炔

石墨炔（Graphdiyne），是继富勒烯、碳纳米管、石墨烯之后，一种新的全碳纳米结构材料，具有丰富的碳化学键、大的共轭体系、宽面间距、优良的化学稳定性，被誉为是最稳定的一种人工合成的二炔碳的同素异形体。2010年，中科院化学所有机固体国家重点实验室科研人员在首次通过六乙炔基苯前体的交叉偶联反应，成功地在Cu箔表面合成了高质量的石墨炔薄膜。所制备的石墨炔具有与硅类似的优异半导体特性，石墨炔被认为是堪比石墨烯的“超级材料”，它的加入能改善很多材料的性能

1.5 传感器先进材料技术

碳素材料

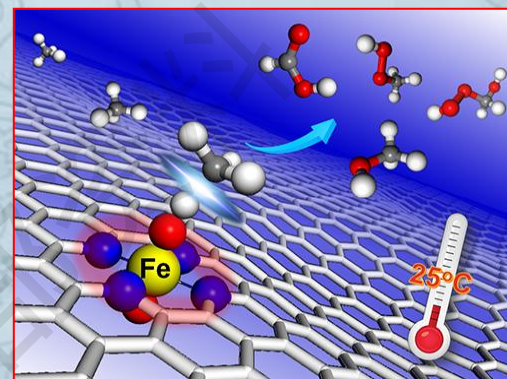
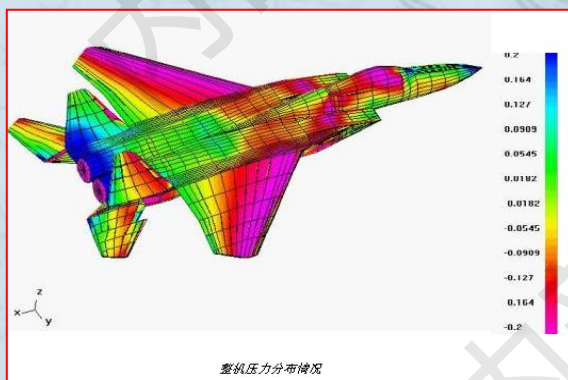
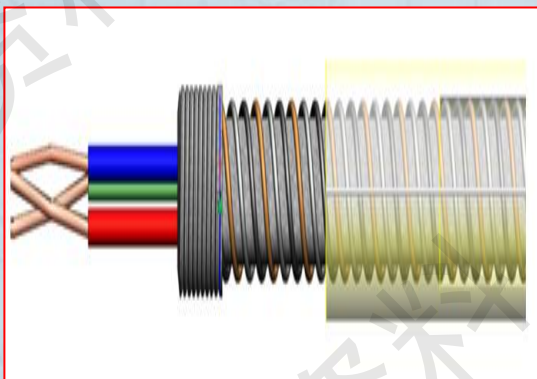


1.6 传感器设计方法

1: 经验设计方法



2: 计算机仿真设计方法



1.6 传感器设计方法

传感器版图设计软件

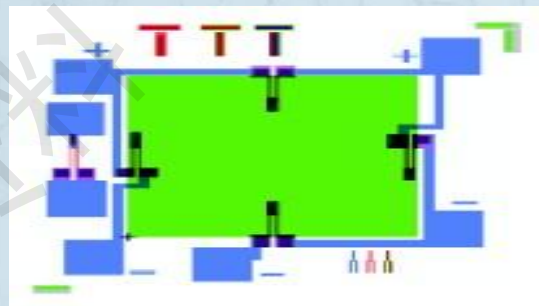
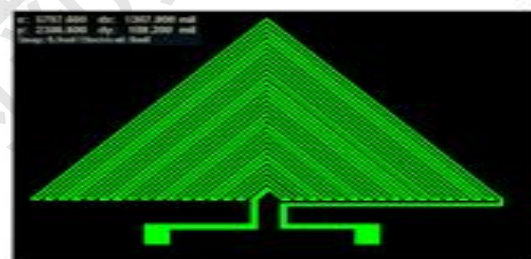
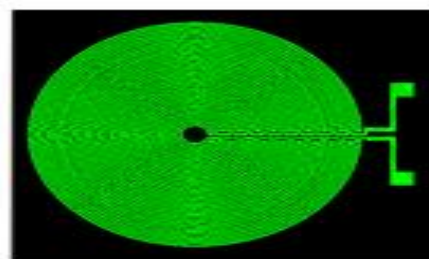
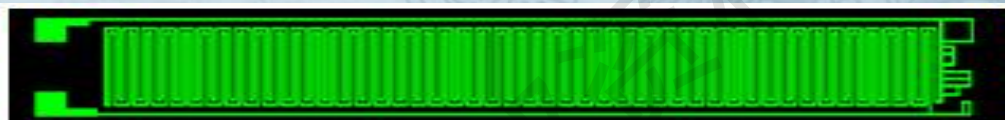
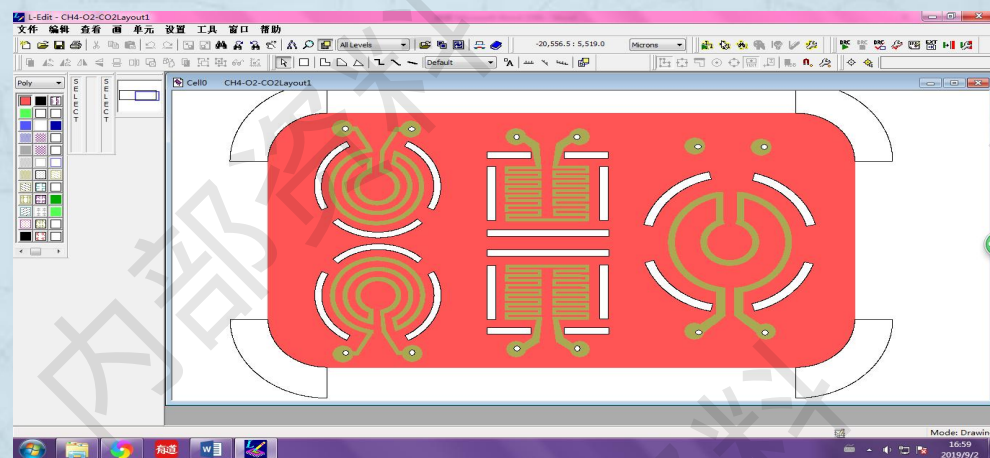
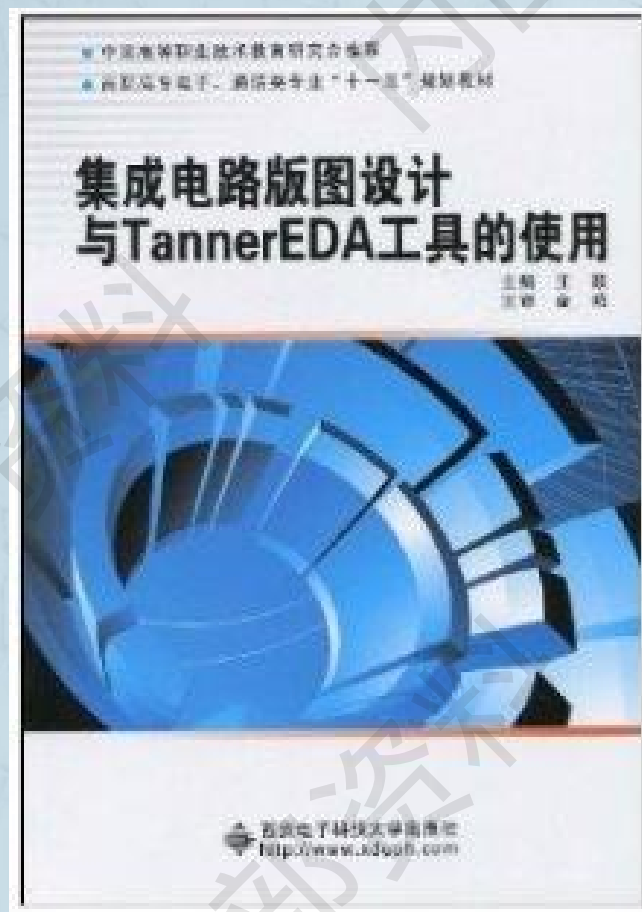
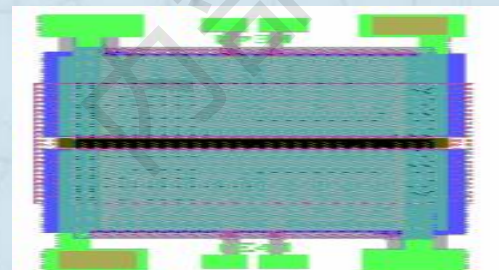
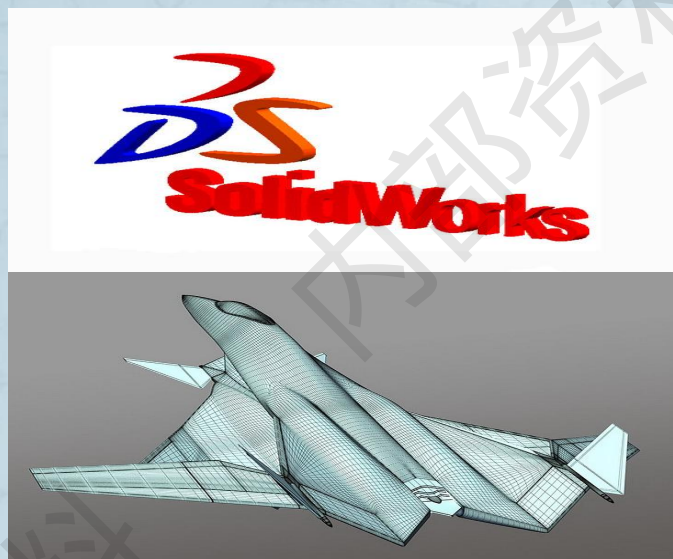


图2 芯片电桥工艺版图

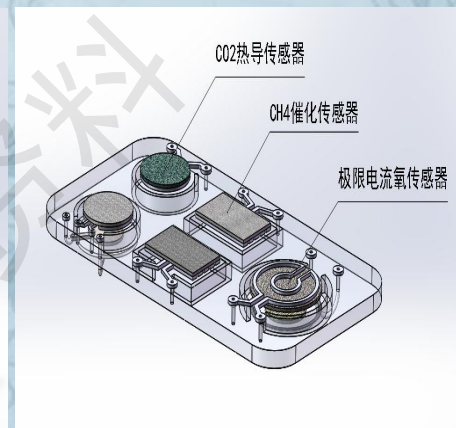
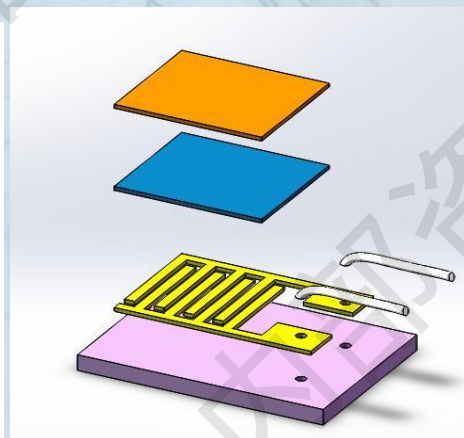
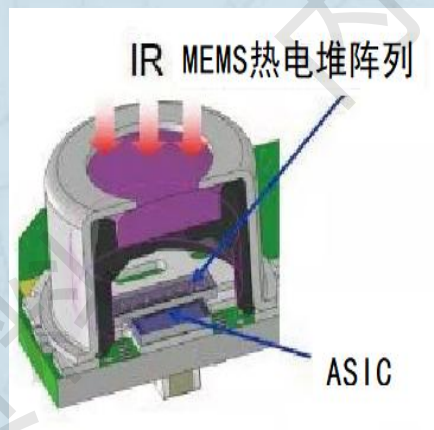
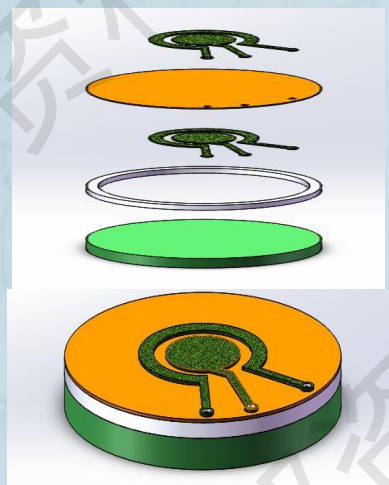


1.6 传感器设计方法

传感器三维实体造型软件

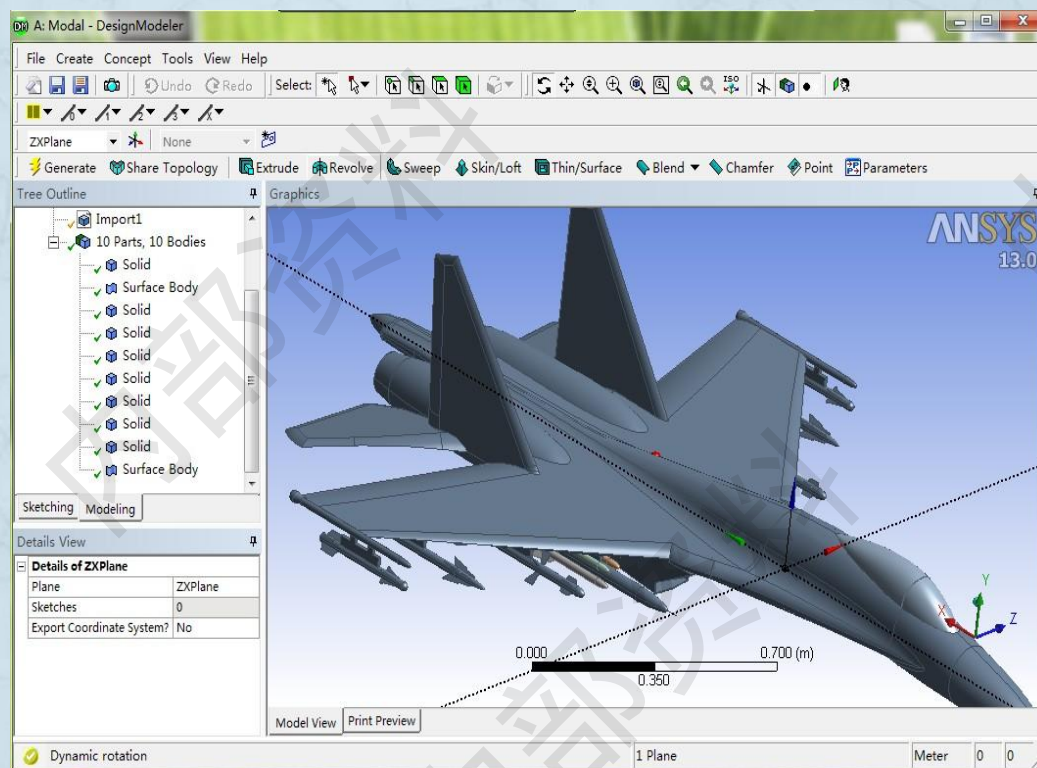
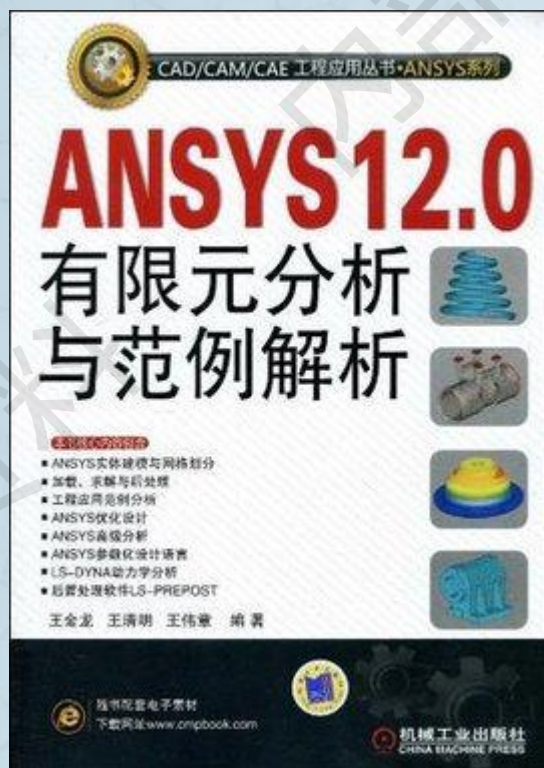


SolidWorks 提供了解决**应力分析**、**频率分析**、**扭曲分析**、**热分析**和**优化分析**。SolidWorks 凭借着快速解算器的强有力支持，能够使用个人计算机快速解决大型问题。因其操作简单易学，分析速度快而被接受，适合设计工程师使用。



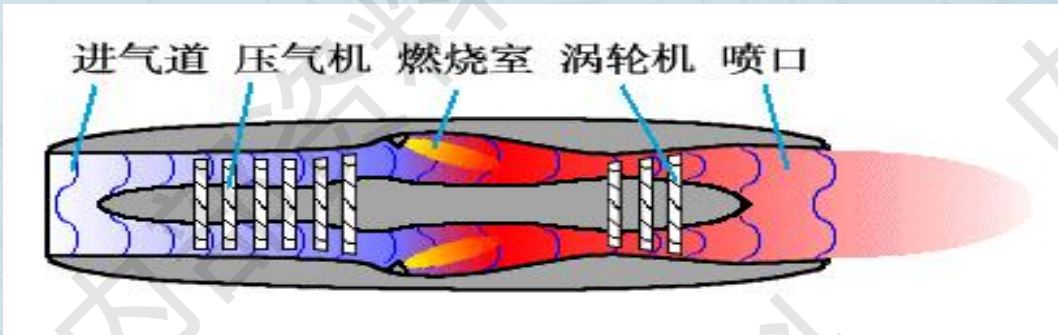
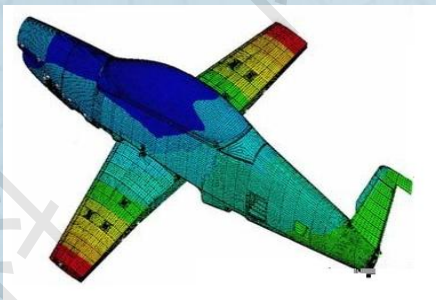
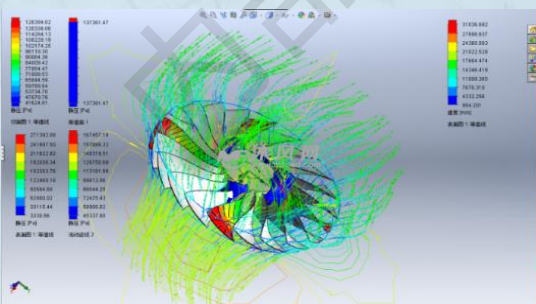
1.6 传感器设计方法

传感器多物理场有限元分析软件

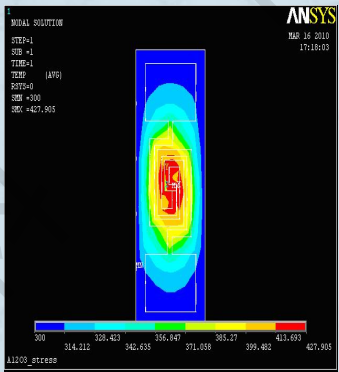


1.6 传感器设计方法

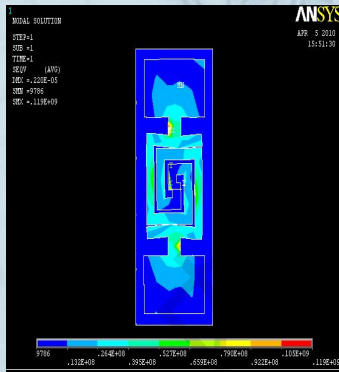
温度场有限元分析



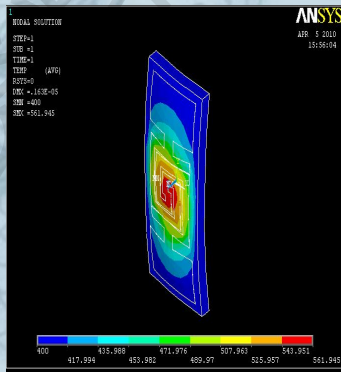
芯片版图



温度场分布



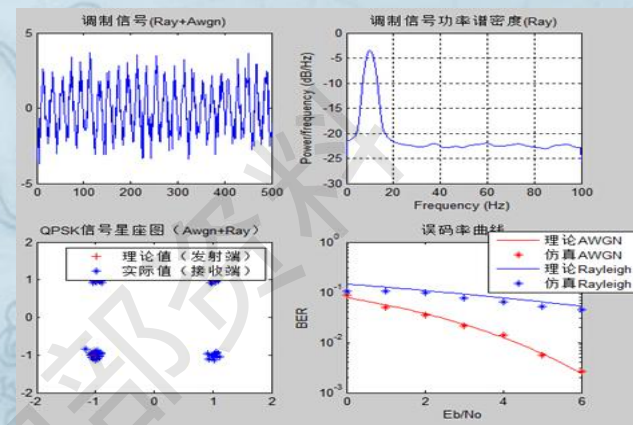
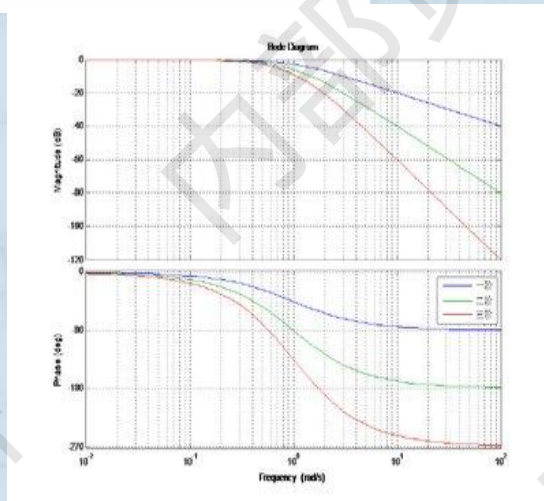
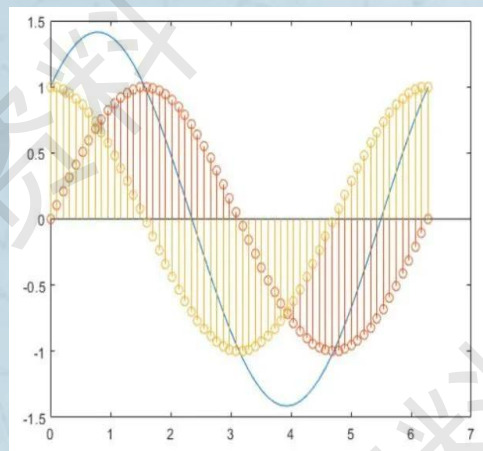
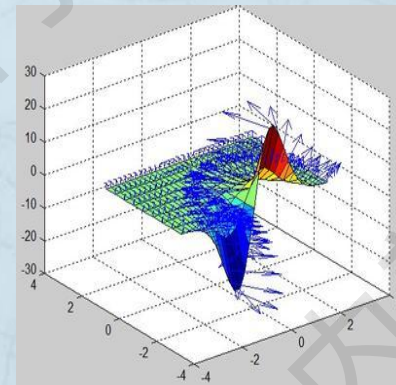
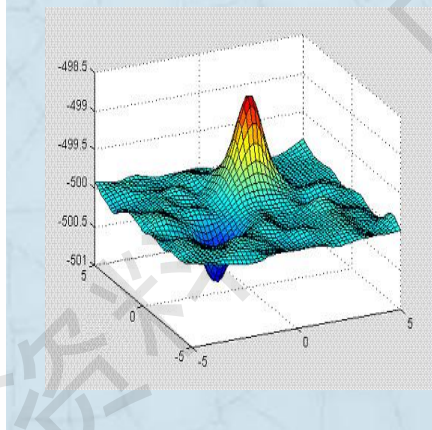
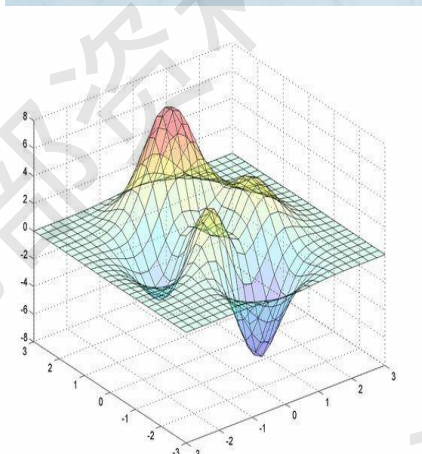
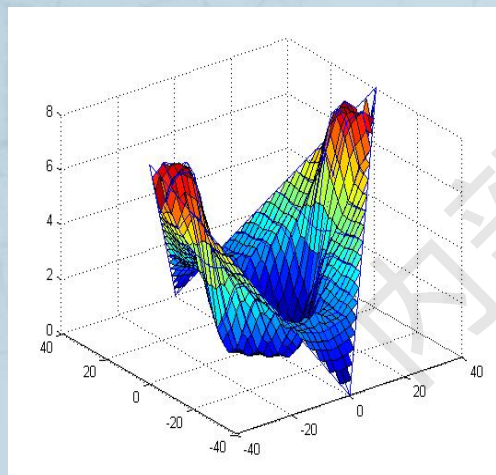
应力分布



位移分布

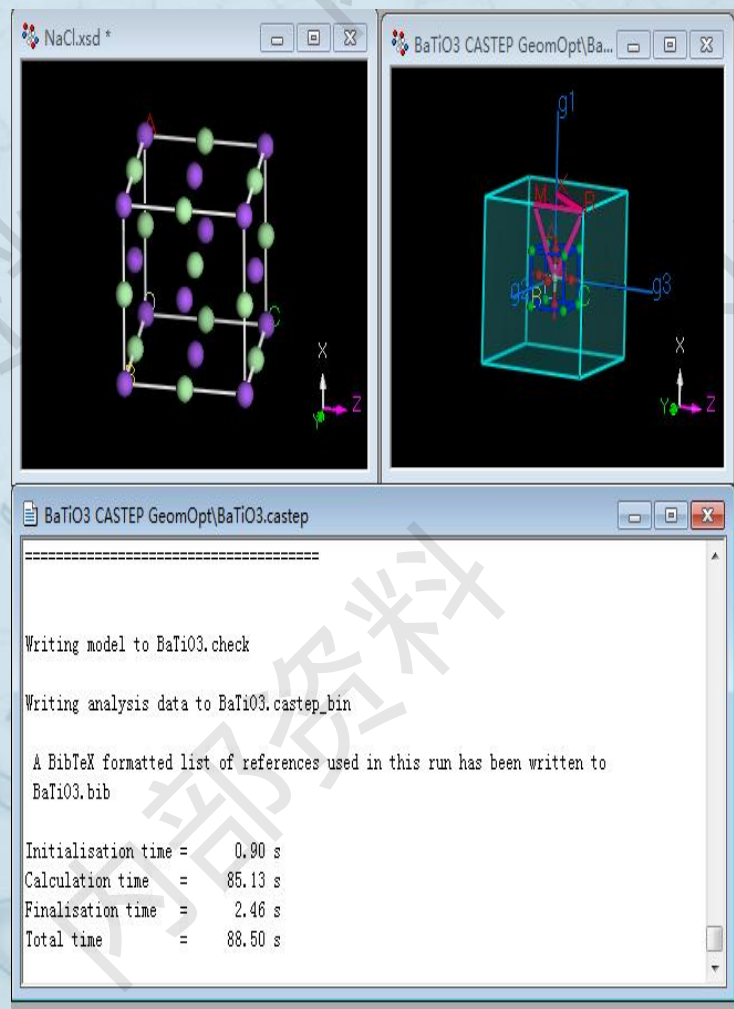
1.6 传感器设计方法

MATLAB数学软件：算法开发、数据可视化、数据分析、数值计算

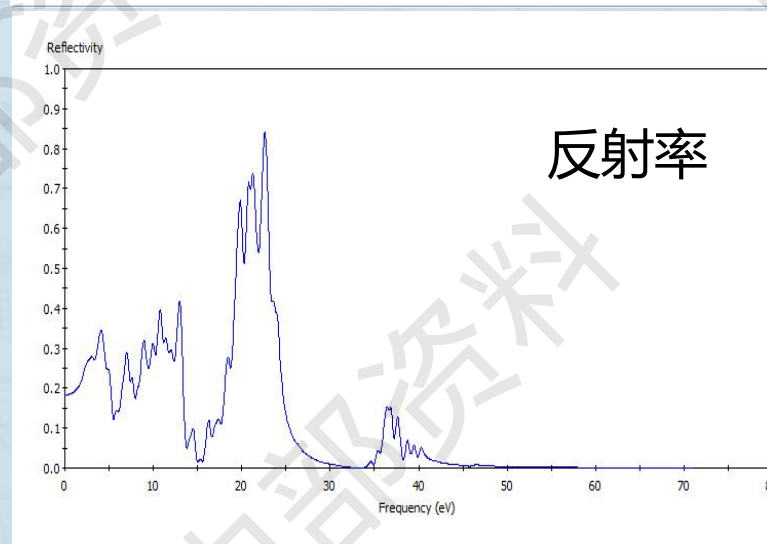
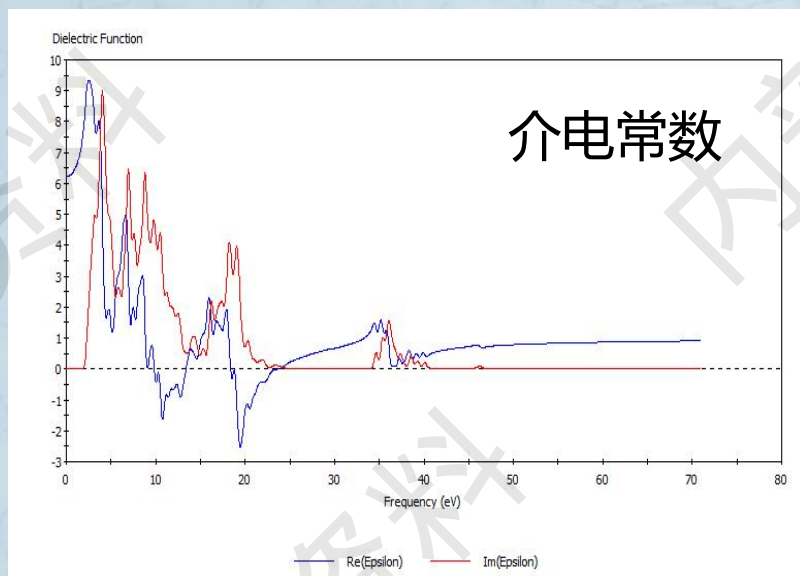
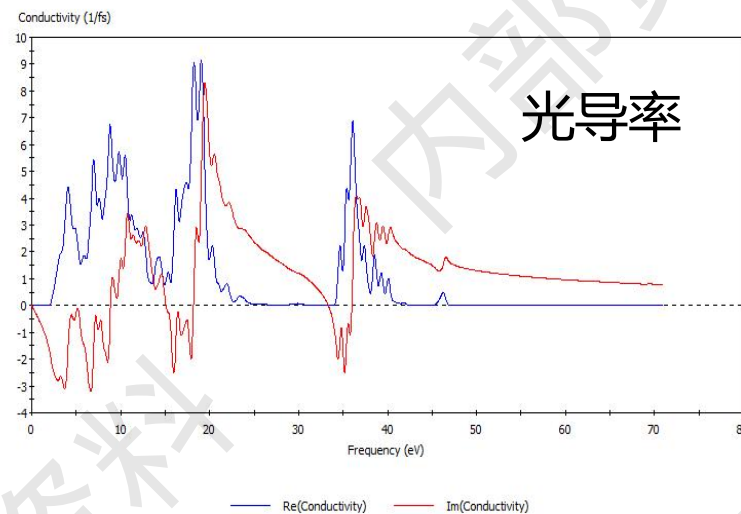
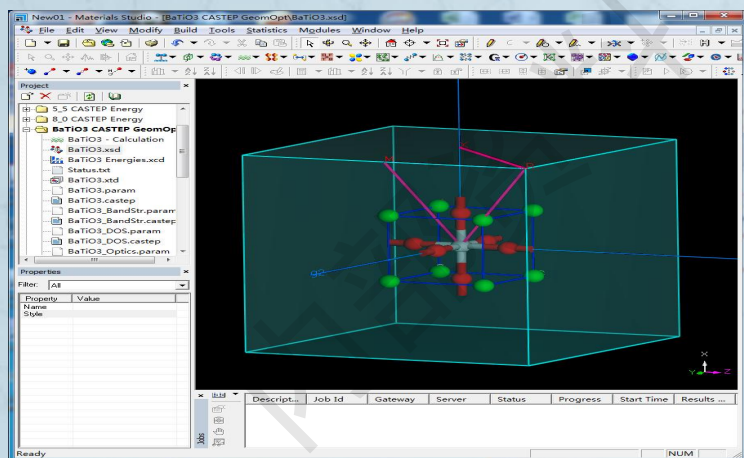


1.6 传感器设计方法

- Material Studio 第一性原理
- 基态能量与电子结构的计算
- 晶体结构弛豫

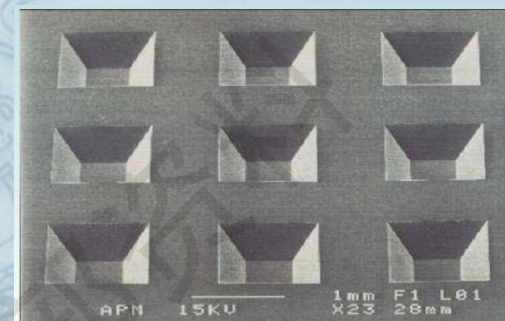
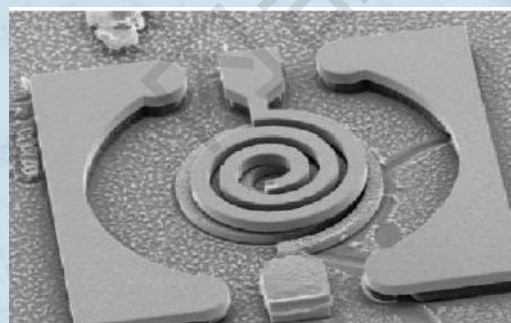
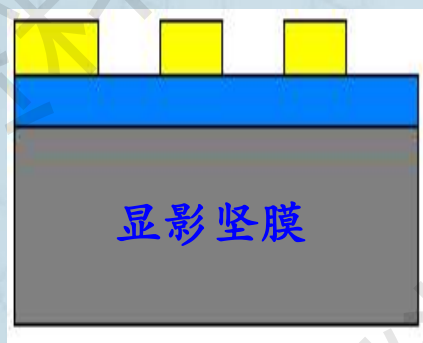
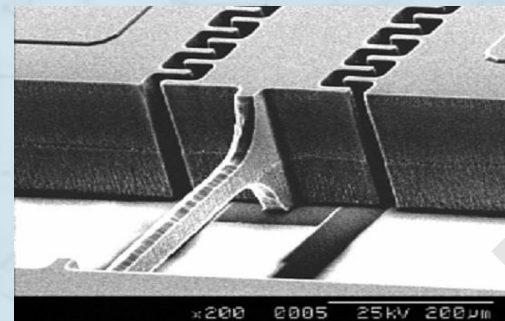
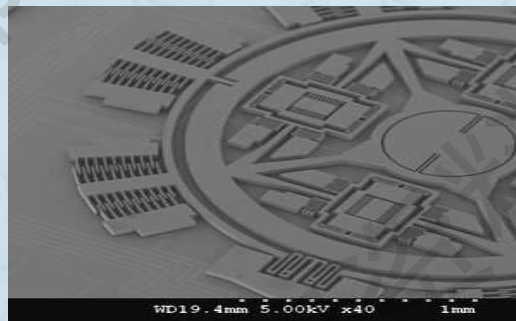
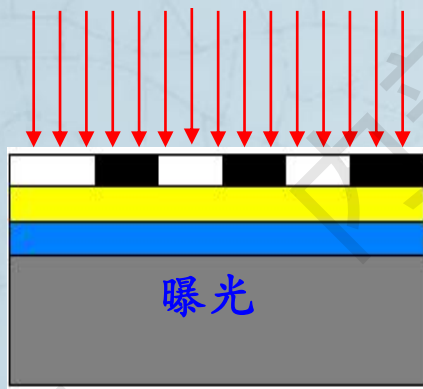


1.6 传感器设计方法



1.7 传感器制造技术

传感器先进制造技术-MEMS技术



光刻

表面微加工

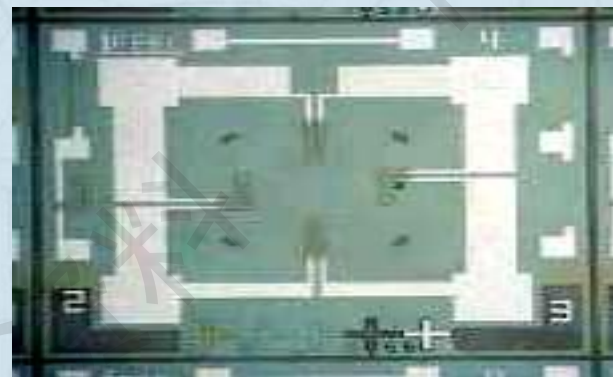
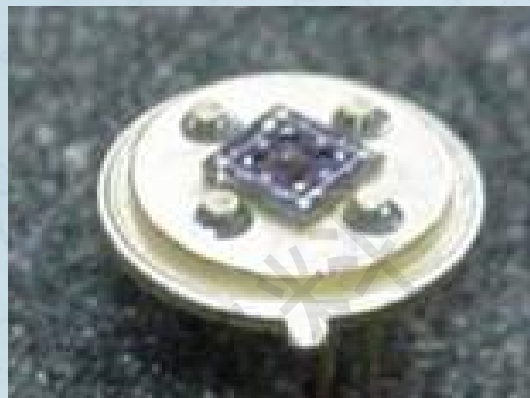
体微细加工

1.7 传感器制造技术

硅微加工压力传感器



传感器芯片示意图



Pressure sensor



1.7 传感器制造技术

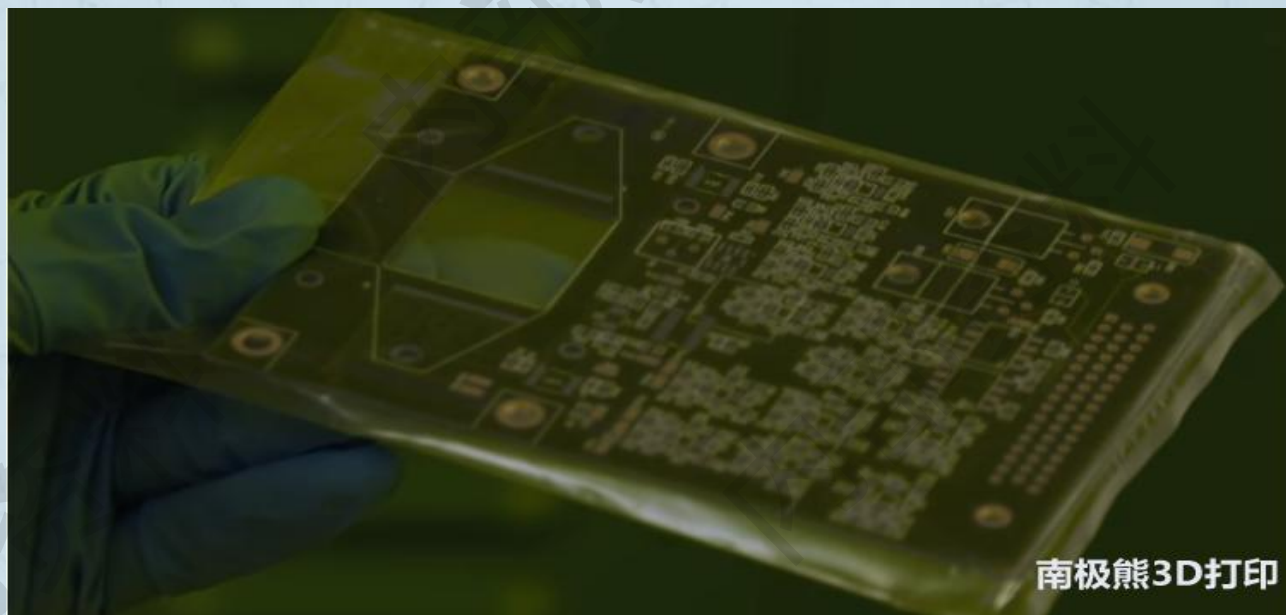
近十年，随着硅MEMS工艺技术的成熟，人们开始寻求新的传感器件制作技术，其中3D打印技术开始得到业内的极大关注。3D打印技术的一个重要分支就是微增材制造技术。随着电化学微增材制造器件功能的高度集成，结构的复杂化、三维化、小型化，给精密制造技术带来新的技术挑战。电化学微增材制造涉及二种较为先进的技术，其中一种是3D打印制造微金属构件，另一种是3D打印制造微陶瓷件。

1.7 传感器制造技术

传感器先进制造技术-3D打印技术

2019年，美国NASA资助的研究人员将应用3D打印技术和制造方法来打印传感器，在一块不超过手机的单板上进行无线通信的部分电路。

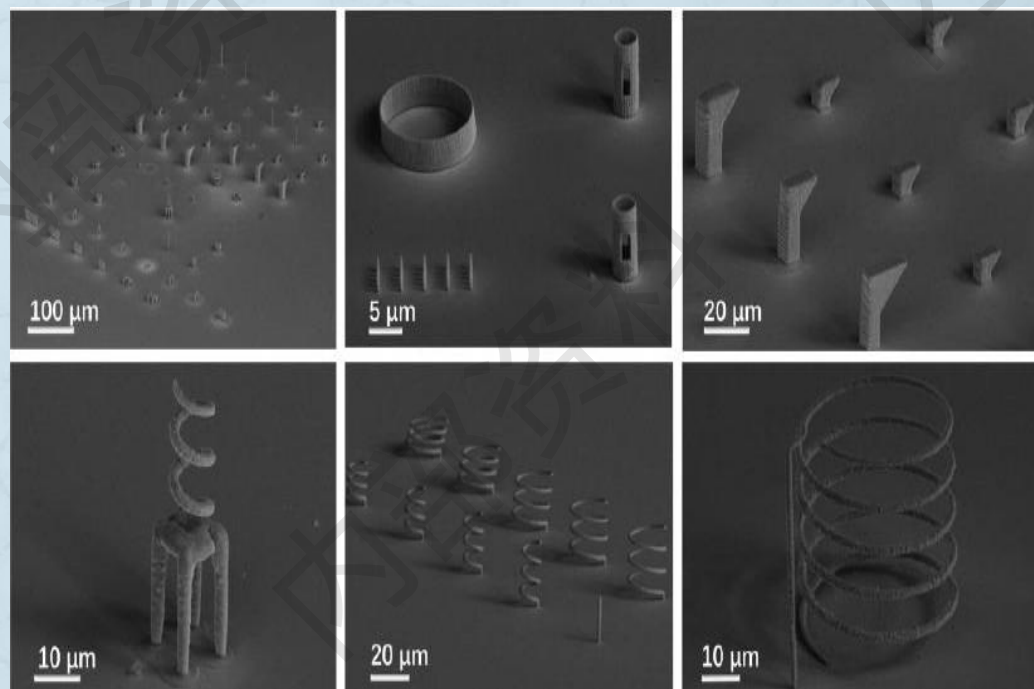
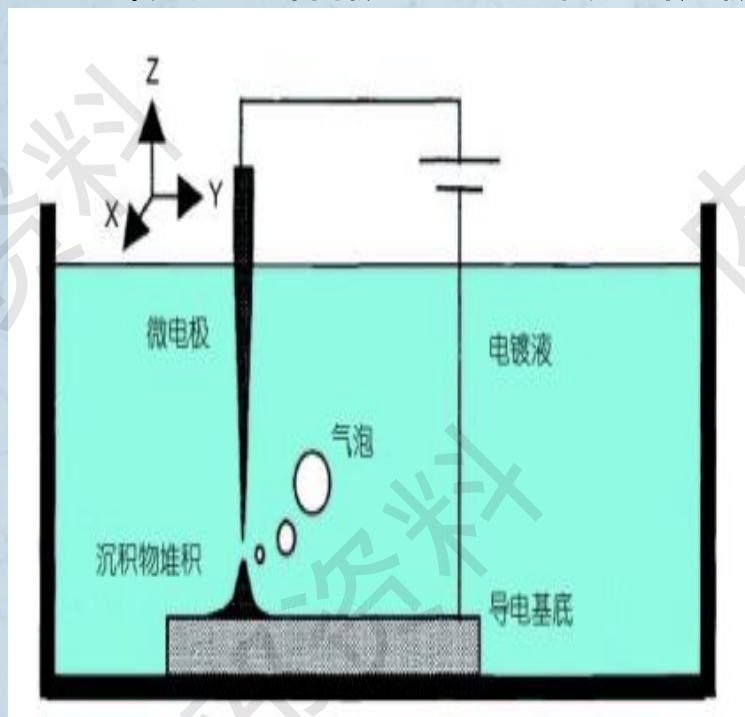
研究团队正在研究的3D打印技术将简化这些基本平台生产,使用纳米材料，如碳纳米管，石墨烯等，将在一个工艺中在同一基板上打印所有必要的传感器。甚至可以3D打印平台所需的无线通信电路的一部分，以将数据传送到地面控制器。



1.7 传感器制造技术

1、局域生长电沉积技术 (LECD)

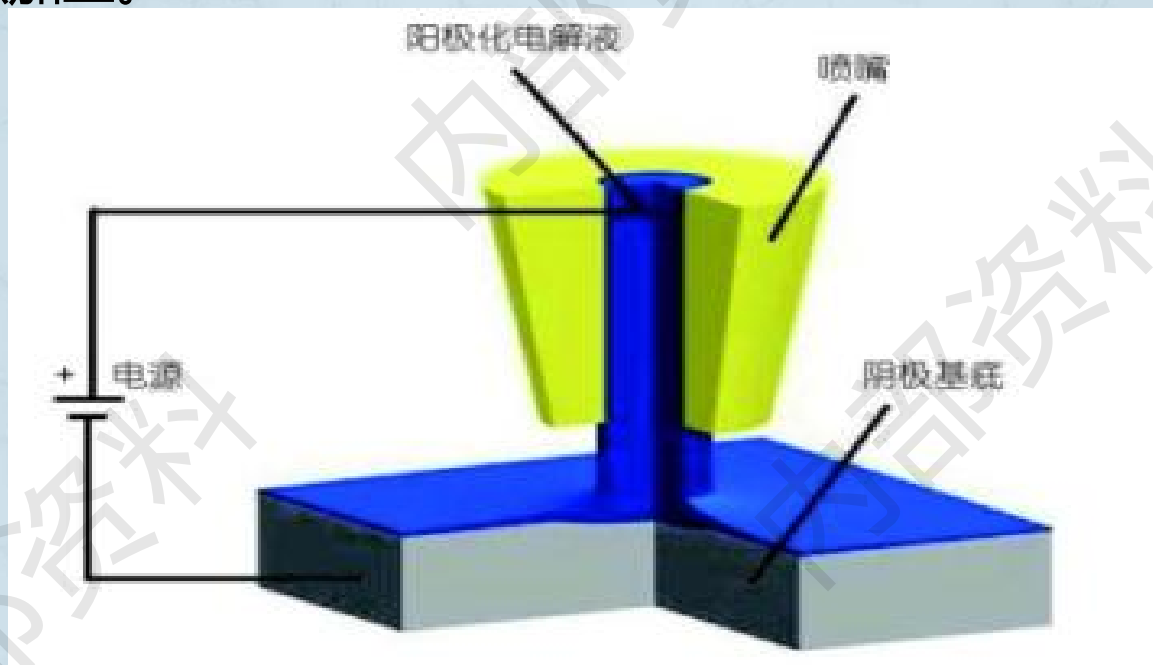
局域生长电沉积是一种无膜三维电化学沉积技术。它是由美国麻省理工学院提出，利用尖端定向的局域电场来诱导电化学反应，以在导电基底上成形具有三维形状特征的金属、合金、导电聚合物结构件。核心理念是：把电场分布进行局域化，从而使沉积金属仅局限在与阳极正对的微小阴极区域。



1.7 传感器制造技术

2、喷射电沉积技术 (Jet ECD)

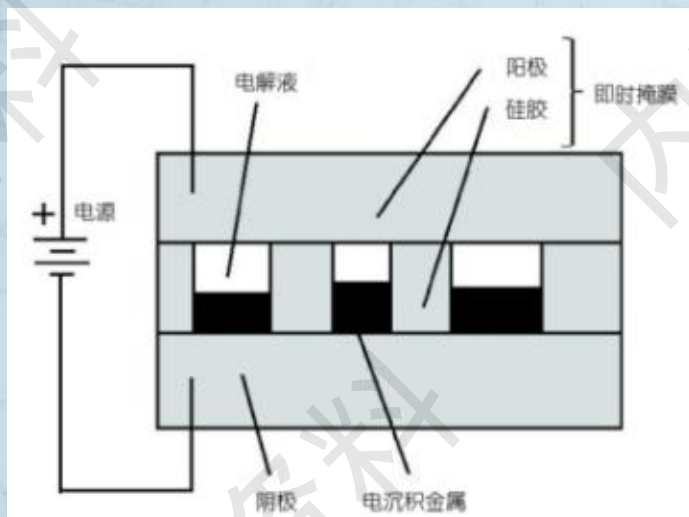
喷射电沉积技术是一种**选择性电沉积加工技术**。美国国家航空航天局以高速射流选择性电沉积技术为基础，发明了扫描喷嘴电沉积加工系统。从喷嘴高速射出的“阳极化”的电解液液束冲击阴极表面，液束中的金属离子在电场的作用下被还原为原子并堆积在阴极上，进而实现选择性电沉积加工。



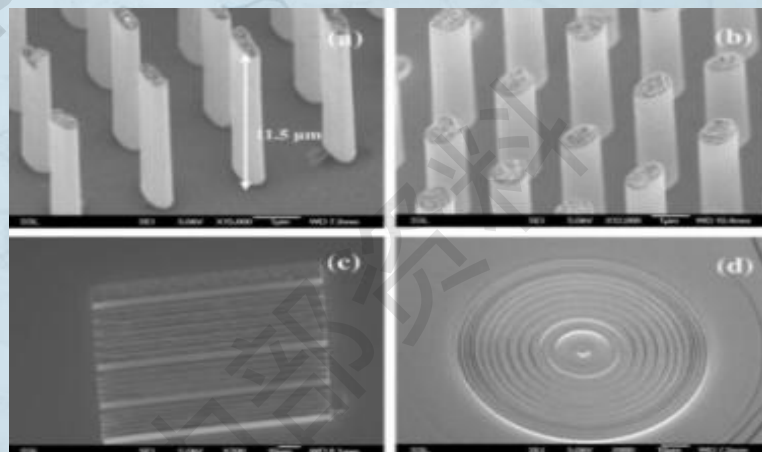
1.7 传感器制造技术

3、掩膜电化学沉积方法

掩膜电沉积技术发展主要服务于集成电路、印刷电路板等领域。掩膜制备是掩膜电沉积技术的核心和关键环节。为实现高精度、高深宽比微细结构零件的制造，德国学者于开发出 LIGA 技术。该技术已实现深宽比最高可达500、侧壁垂直度大于89.9°、侧壁表面粗糙度小于10nm微结构与零件的制造。



掩膜电沉积原理示意

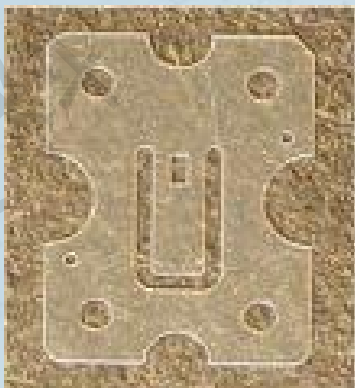


LIGA加工的微细结构零件

1.7 传感器制造技术

4、电化学陶瓷微增材制造方法

利用电化学腐蚀生长技术进行材料叠加制造的，其原理是利用阳极氧化原理，将金属材料氧化成金属氧化物，随着阳极氧化的深入进行，氧化成的金属氧化物逐层增加，从而实现增材制造目的。



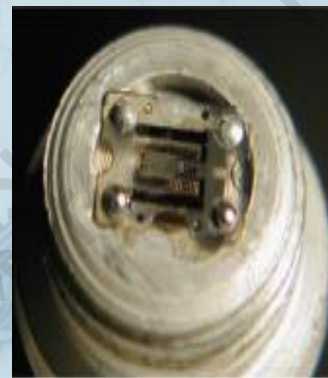
敏感芯片微结构体



电极正面



电极正面

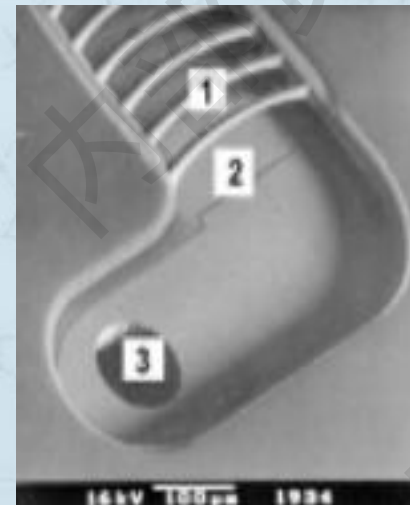
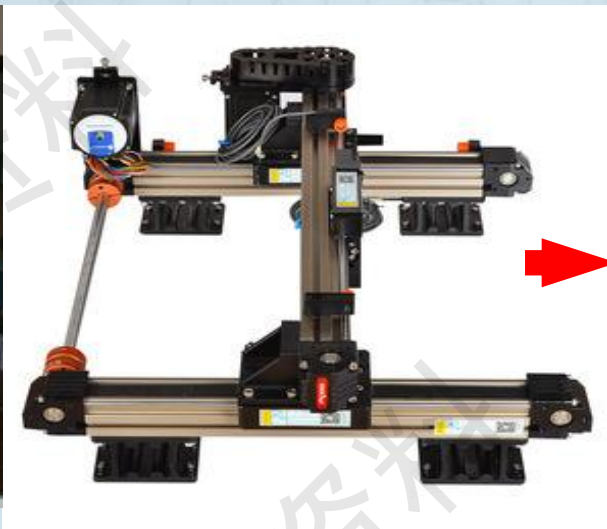


封装实物照片

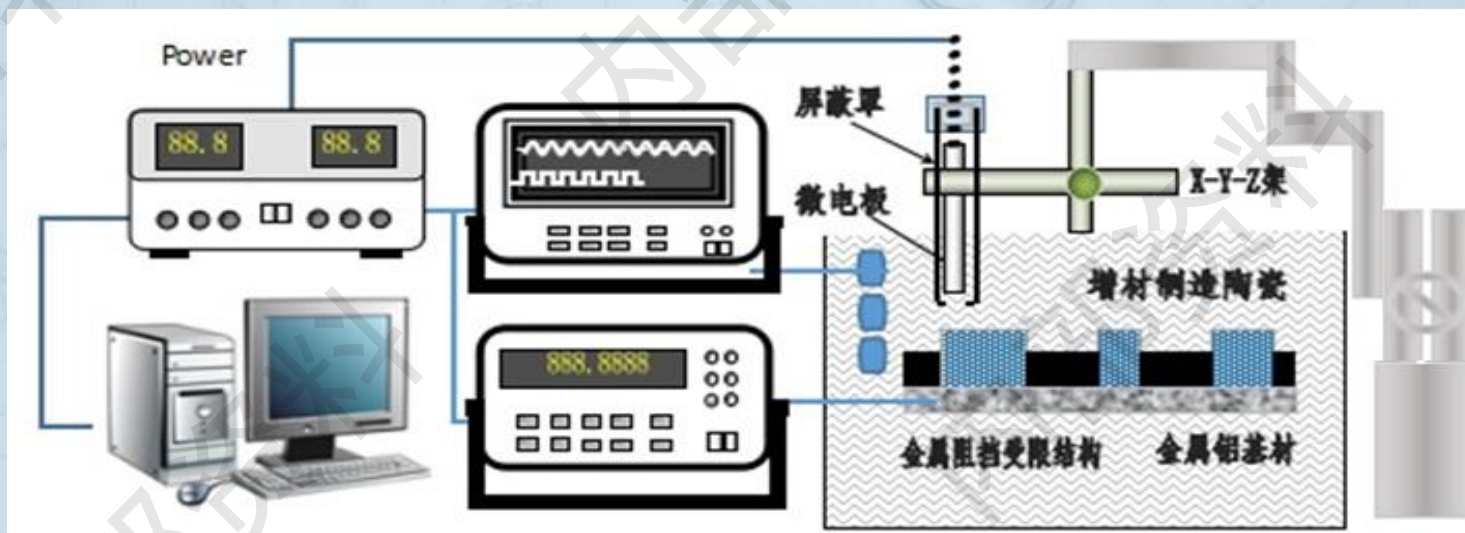
1.7 传感器制造技术



电化学微增制造装置



电化学微增制造样件



电化学微增材制造装置改进设想图

1.8 传感器的发展趋势

传感器技术的研究方向：

- 提高与改善传感器的技术性能；
- 寻找新原理、新材料、新工艺及新功能等。

1.8 传感器的发展趋势



掌握：

传感器的发展方向

- 微型化

- 采用微纳加工手段制造出特征尺寸达到微纳米的微型器件。

- 集成化

- 传感器与放大、运算、补偿等环节一体化，组装成一个器件。

- 多功能化

- 多参量传感器的集成制造技术，多功能传感器的一体化。

- 智能化

- 传感器与微处理器相结合，不但具有检测功能，还具有逻辑判断、自诊断、自校准、自确定等人工智能。

- 网络化

- 传感器通过网络构成分布式、智能化信息处理节点（系统）。