

课 程 教 案

(2019-2020 学年 第二学期)

课 程 名 称： 微机电系统设计与应用

授 课 学 时： 54

授 课 班 级： 2017 电子

任 课 教 师： 张培玉

河南大学

教案（首页）

课程编号	02301006	授课 班级	2017 电子	学生 人数	107
课程名称	微机电系统设计与应用				
课程类型	公共基础课（）；学科基础课（）；专业基础课程（√）； 基础选修课（）；专业选修课（）；公选课（）				
授课方式	理论（√）实验（）实习（）	考核方式	考试（√） 考查（）		
课程总学时	54	学 分	2.5		
学时分配	课堂讲授 54 学时； 实践课程 学时				
教材名称	《微机电系统（MEMS）工艺基础与应用》				
教 学 参 考 书	<p>王喆焱，《微系统设计制造》，清华大学出版社，2008年，2016年第二版</p> <p>莫锦秋，梁庆华，汪国宝，王石刚 编著.《微机电系统设计与制造》. 化学工业出版社，2004年3月</p> <p>刘广玉，樊尚春，周浩敏.《微机械电子系统其应用》.北京航空航天大学出版社 2003年2月</p> <p>孙以材，庞冬青，《微电子机械加工系统（MEMS）技术基础》，冶金工业出版社，2009年3月</p> <p>徐泰然（著），王小浩等（译），周兆英等（较）.《MEMS和微系统-设计与制造》.机械工业出版社 2004年1月</p>				
授课教师	张培玉	职称	教授	学科	电子
授课时间	星期一、星期六：10：00-12：30			授课地点	网络课程 金综 1201、 4102

第一章 微机电系统组成和应用

(3+3 学时)

一、教学目的及要求

了解 MEMS 的概念、发展现状。熟悉几种典型的 MEMS 产品及其应用。

二、教学重点及难点

重点：MEMS 的概念和应用。难点：MEMS 的概念。

三、教学手段

采用多媒体和板书相结合的手段，图、文、声并茂多方位阐述。

四、教学方法

课题提问、讨论、启发、演示等方法阐明该学科的外延和内涵。

五、作业

布置思考题。

六、参考资料

见参考书。

七、教学内容与教学设计

以习近平中华民族伟大复兴的中国梦，引出每个人的梦想，强调总书记的中国梦分解为每个人的梦想。在全国人民抵抗肺炎的战争中，宅心仁厚的医生的梦想是天下无病，治愈病人。在新型冠状病毒肺炎的大灾难目前，建筑工人梦想就是尽快建设医院，在社会主义优越的制度下，“火神山”医院 7 天奇迹般地矗立在世人的面前。引出我的梦想，无痛注射。如何实现梦想？通过微机电系统技术实现，该技术就是本门课程所要讲述的内容，同时，也要感谢国家自然科学基金委员会，立项自然科学基金面上项目，资助我开展该项研究，实现我的梦想。另外，MEMS 技术也能助力疫情防控，MEMS 红外传感器集体测体温，MEMS 诊断芯片-可以快速诊断冠状病毒。微量样品，快速，精准。

尽管当前抗疫形势严峻，但举国上下正齐心协力，勇敢迎接此次考验。无论是奋战在一线的白衣天使，还是捐款捐物的爱心企业，普通民众的摇旗呐喊，都展现出了中国强大凝聚力和中国人民坚强的决心和信心。作为科技工作者的我们和未来社会的栋梁的您们，更应该责无旁贷努力学习，打下未来走入社会奠定扎实的基础和能力。实干兴邦，空谈误国。为了实现我们每个人的梦想，就需要

每个人做好自己的本职工作，从我做起，脚踏实地的实现自己的梦想，唯此，就是为实现总书记中国梦做贡献。

一、微电子机械系统的应用、发展

1、定义、研究内容；2、分类；3、应用

1、定义、研究内容；

a) 微机电系统 (Micro Electro-Mechanical Systems , 缩写为 MEMS , 美加惯用词)

b) 微机械 (Micromachine , 日本惯用词)

c) 微系统技术 (Microsystems Technology , 欧洲惯用词)

发展史；

2、微电子机械系统分类

A、常规 MEMS 研究 General MEMS 基础研究理论、应用研究，包括传感器、执行器等。

B、生物 MEMS: BioMEMS

C、光学 MEMS: Optical MEMS

D、微流体: Microfluid

E、RF MEMS

3、研究内容及应用

A、常规 MEMS 研究

基础研究理论、应用研究，包括传感器、执行器等。

例如：微尺度效应、多能域耦合效应、微尺度下的动力学等。

B、生物 MEMS: bioMEMS

C、光学 MEMS: Optical MEMS

D、微流体: Microfluid

国内的主要研究现状及成果

二、研究内容

介绍本人的研究成果，让同学们对科研有身临其境的感性认识。培养同学的科研兴趣。

- 生物 MEMS: BioMEMS

- 光学 MEMS: Optical MEMS

- MEMS 研究

三、力学的基本知识

介绍相关材料力学的基本知识包括受力的四种基本状态等。

八、课后小结

小结本节内容，重点微机电系统的应用。

第二章节微机电系统的功能材料

(6 学时)

一、教学目的及要求

了解常用的微机械电子系统功能材料的基本物理、化学性质，掌握针对特定功能的微型元器件设计时的功能材料选择方法。

二、教学重点及难点

重点：硅的基本物理、化学性质。难点：硅的晶体结构。

三、教学手段

采用多媒体和板书相结合的手段，图、文、声并茂多方位阐述。

四、教学方法

课题提问、演示等方法阐明材料的基本性质，讨论材料选择方法。

五、作业

布置思考题。

六、参考资料

见参考书。

七、教学内容与教学设计

一、MEMS 常用材料

- 半导体材料：硅及其化合物等。
- 电致伸缩材料：压电陶瓷、氧化锌、石英等。
- 磁致伸缩材料：镍铁合金等。
- 形状记忆材料：镍钛合金等。
- 其它：特殊功能聚合物、复合材料及人工构造薄膜材料、电流变液或磁流变液材料、纳米相材料等。

● 选用依据及实例：

具体设计时，应根据微型元器件的功能，选用能获取系统性能的材料。

例如、对于起制动作用的器件，应选用压电陶瓷、石英、镍钛记忆合金等材料；用做器件和衬底的绝缘层，则可选用硅的氧化层 SiO_2 或 Si_3N_4 等。

导电性：电阻率

二、半导体功能材料

1 硅及其化合物材料

单晶硅、多晶硅、硅—蓝宝石、化合物半导体材料、SiC 薄膜材料。

2 硅的材料特性

- a、硅的熔点高（1400℃），约为铝的两倍，高熔点使其具有良好的高温稳定性；
- b、硅的热膨胀系数比钢小 8 倍，比铝小 10 倍；
- c、具有很好的导热性，是不锈钢的 5 倍；
- d、硅没有机械迟滞性能，是理想的传感器和致动器材料；
- e、与微电子集成电路工艺兼容，易与微机械和微电子线路集成，便于实现批量化生产。

发展史；

3、硅的晶体结构

基本上是面心立方体晶胞。硅晶胞的主平面（100）、（110）、（111）

硅材料的各向异性

4、单晶硅的生产

● 单晶硅的提纯

经过连续分馏、逆向反应及气化分离，可以得到固态的“电子级硅”，它可以作为单晶硅生产的原料。

● 单晶硅的生长或“拉制”

常用方法：Czochralski (简称为 CZ 法) 和悬浮区法。

● 单晶硅的机械加工

● 硅的掺杂 P 型掺杂、N 型掺杂；N 型硅和 P 型硅—半导体材料

A、P 型硅是在纯硅材料中加入了硼（B）原子：由于 B 原子外面带有 3 个正电荷，这样当两种原子结合到一起形成共价键时，产生空穴。

B、N 型硅是在纯硅材料中加入了砷（As）或磷（P）原子：由于硅原子外面为带有 4 个正电荷，而 As 或 P 原子外面带有 5 个正电荷，这样当两种原子结合到一起形成共价键时，产生游离电子。

掺杂破坏的纯硅材料电子的平衡，促使电子流动加剧，导电性能得到提高。掺杂浓度越高，电阻率越低，越容易导电。

5、多晶硅

● 多晶硅是许多单晶(晶粒)的聚合物。这些晶粒的排列是无序的，不同晶粒有不同的单晶取向，而每一晶粒内部有单晶的特征，因而在热分析和结构分析时可看作各向同性材料。

● 晶粒与晶粒之间的部位叫晶界，晶界对其电特性的影响可以通过控制掺杂原子浓度来调节。现就多晶硅的电阻率、电阻温度系数及电阻应变灵敏系数与掺杂原子浓度的关系论述如下。

多晶硅的特点

- 1、具有较宽的工作温度范围（-60 度~+300 度）；
- 2、可调的电阻率特性；
- 3、可调的温度系数；
- 4、较高的应变灵敏系数及容易调整。
- 5、与单晶硅压阻膜相比，多晶硅压阻膜可以在不同的材料衬底上制作(如在介电体),而且可以更有效地抑制温度漂移，有利于长期稳定性的实现。

硅—蓝宝石（SOS）

硅—蓝宝石材料是通过外延生长技术将硅晶体生长在蓝宝石（ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ）衬底上形成的。硅晶体可以认为是蓝宝石的延伸部分，二者构成硅—蓝宝石 SOS 晶片。

硅—蓝宝石特点

- 1、蓝宝石材料为绝缘体；
- 2、蓝宝石材料的迟滞和蠕变小到可以忽略不计；
- 3、蓝宝石化学稳定性好，耐腐蚀，抗辐射性能 强；
- 4、蓝宝石机械强度高。
- 5、硅—蓝宝石材料又脆又硬，其硬度仅次于金刚石，制作工艺技术比较

复杂。

(所以利用硅—蓝宝石可以制作出具有耐高温、耐腐蚀及抗辐射等优越性能传感器和电路)

SiC 薄膜材料

SiC 是一种特殊环境下使用的化合物半导体。它由碳原子和硅原子组成，利用离子注入掺杂技术将碳原子注入单晶硅内，便可以获得优质的立方晶体结构的 SiC。

特点：具有优异的物理、化学及电学性能，高强度（是单晶硅的 3 倍）、大刚度、内部的残余应力很低，较高的压阻系数，熔点高（2300 ）。因此，SiC 材料能在高温下耐腐蚀、抗辐射，非常适合于高温、恶劣环境下工作的微机电系统的选择使用。

由于 SiC 单晶材料成本高、硬度大及加工难度大，所以以硅单晶片为衬底的 SiC 薄膜就成为研究和使用的理想选择。与单晶 SiC 薄膜相比，多晶 SiC 的适用性更广。

压电材料

● 压电效应

压电材料的主要属性是，其弹性效应和电极化效应在机械应力或电场（电压）作用下将发生相互耦合，也就是应力—应变—电压之间存在内在联系。

● 正压电效应

在机械应力作用下，将机械能转换为电能。

● 逆压电效应

在电压作用下，将电能转换为机械能。

压电材料的特点及应用

● 压电材料可以大块使用也可以小块分散使用，利用正压电效应感知外界的机械能，可以制作微传感器；利用逆压电效应作为驱动力，可以制作压电微执行器。

● 由于压电材料的变形量十分微小，一般仅在几个 nm/v，单个压电元件的变形量约为总长度的 0.1%~0.2%，这在需要精密定位的微操作器中很有意义。

● 压电材料作驱动器时，它的激励功率小，响应速度较快，是形状

记忆合金的一万倍。压电器件可做得很薄，且组合灵活。

常用压电材料 压电陶瓷

● 陶瓷材料是以化学合成物质为原材料，经过精密的成型烧结而成。烧结前，严格控制合成物质的组份比，便可以研制成适合多种用途的功能陶瓷，如压电陶瓷（电致伸缩材料）、半导体陶瓷、导体陶瓷、磁性陶瓷及多孔陶瓷等。

● 压电陶瓷是陶瓷经过电极化之后形成的，电极化之后的压电陶瓷为各向异性的多晶体。

压电陶瓷的特点

● 用于致动器和传感器元件的压电陶瓷，具有价廉、质轻小巧、易于与基体结合、响应速度快等优点。此外，它对结构的动力学特性的影响很小，并且通过分布排列可实现大规模的结构驱动，因而**具有较强的驱动能力和控制作用**。

● 由于**压电陶瓷具有微小位移且精度高**这一突出优势，适应微机械、微机器人微小位移控制的要求，**用作压电驱动器是比较理想的**。

磁致伸缩材料

形状记忆合金

● 形状记忆合金（SMA）是一种具有记忆功能的金属材料，即在制作元件时，赋予它一定的形状。在较低温度下，它会改变这种形状；当温度升高到原来温度时，它又会恢复到原来形状。

● 形状记忆特性的本质是材料的热弹性通过马氏体相变，将热能转变为机械能。

● 可以通过电流加热的方式，形状记忆合金能发出很大的力，适用于制作制动器或驱动器，如微阀、微泵等。

形状记忆合金的应力应变特性

热弹性相变与温度、应力及应变有关。在低温或高温状况下，卸载过程结束时，均无残余的非弹性应变，而呈现出完全弹性。

形状记忆合金的特点

● 形状记忆合金的记忆性随合金材料的不同而不同。最大可恢复应

变的记忆上限为 15%，即形状的变形程度达到原形的 15% 时，还能“记住”原先的外形，只要通过加热，形状即可恢复。超过 15% 时，“记忆”将不再现。

- 形状记忆合金的电阻率较大，故常采用电流加热方式。在恢复其“记忆”形状的过程中，形状记忆合金能发出很大的力，适用于制作致动器或驱动器。如微泵、微阀等

- 由于形状记忆合金的动作依靠加热和冷却，因此，形状记忆合金的驱动器的响应时间比压电材料驱动器长，但压电材料最大可恢复应变只有 1%。

- 形状记忆合金的最大缺点是要有热源，长期使用会产生蠕变，因此，使用时要注意寿命期限。

形状记忆合金的常用材料

- 在形状记忆合金材料中，**镍钛合金** (TiNi) 为高性能形状记忆合金材料，具有良好的耐疲劳特性、抗腐蚀性以及较大的可恢复应变量 (8%~10%)。**铜基形状记忆合金** (ZnAlCu, NiAlCu 等) 的成本低，约为镍钛合金的 1%，但其最大可恢复应变只有 4%。

微系统驱动器件常用材料性能比较

- 微系统驱动件常用材料主要有压电材料、磁致伸缩材料及形状记忆合金。它们的制动能力来源于电致、磁致及热致产生的机械应变。其主要特点及差别如表所示。

表 2-9 3 类材料几个参数的比较

材 料	输出力	输出位移(应变)	输出频率	功 率
压电材料	中	小	高	小
磁致伸缩材料	小	中	高	小
形状记忆合金	大	大	低	中

电流变液和磁流变液材料

- **电流变液和磁流变液**

电流变液和磁流变液是 2 种神奇的液体。它们经受电场或磁场作用时，其粘性系数会发生巨变。当其处于常态下，可以很容易搅动；但是当其中有电流或磁流穿过时，它会突然间变得很粘稠。

● 电流变液和磁流变液

电流变液和磁流变液是 2 种神奇的液体。它们经受电场或磁场作用时，其粘性系数会发生巨变。当其处于常态下，可以很容易搅动；但是当其中有电流或磁流穿过时，它会突然间变得很粘稠。

● 虽然电流变液和磁流变液二者的物理性质相似，但实际性能却有明显差异。磁流变液与电流变液的塑性相似；但其**屈服强度**却明显高于者。高达 **80 kPa**。而电流变液的屈服强度仅为 **3kPa**。

● **磁流变液对环境的适应能力强**，不受加工和使用中混入的化学杂质的影响。在一 40~125 度环境下工作时，其屈服强度仅产生微小变化，且原料无毒。对环境无污染。

● **电流变液对于生产环境要求相当苛刻**，须严格的质量控制。另外，相同的配比，不同批的电流变液产品，在性能上会表现出较大的差异。**电流变液**还有另一大缺点，就是**使用的电压很高**，高达几千伏。具有一定的**危险性**。

● 鉴于此，磁流变液的应用倍受关注。现已生产出多种标准的磁流变液产品，可用做减振降噪、衰减结构及损伤愈合等方面的制动器件。

膨胀合金

● 膨胀合金是指在一定温度范围内具有特殊的线膨胀系数的合金。膨胀合金在微机电系统中，多用作它的线膨胀系数一致或接近的其它的材料进行匹配封接，以减小热应力发生的可能。

● 铁镍低膨胀合金、铁、镍、钴及玻璃封接合金、铁镍钴瓷封合金等。

金刚石材料

● 金刚石（钻石—晶体形状的碳）形成与制备

天然金刚石，形成于数百万年前压力极大、温度极高的地壳深处。而人工合成钻石是在巨大的水压中，利用碳（石墨）和金属催化剂制造而成。

● 金刚石（钻石）的特点

材质坚硬、耐强酸强碱腐蚀、耐磨及抗辐射，是一种极佳的热导体，其散热效果比硅还要强 10 多倍。

● 金刚石（钻石）在微系统中的应用

金刚石主要用来制备具有相对运动的活动接触零部件。以及采用化学气相淀积工艺，在微结构的活动接触表面上形成一层金刚石涂层的方法，以增强耐磨性和耐环境的化学侵蚀。

金刚石材料的应用背景

硅及其化合物材料，如单晶硅、多晶硅、二氧化硅及氮化硅，因为它们具有很好的机械性能和工艺性能在微机电系统中被经常使用，但是在某些场合，如旋转电机、微齿轮及接触探头等具有相对运动的活动接触部件，采用硅及其化合物材料，容易磨损。在此情况下，选用摩擦系数小、耐磨性能好的材料，对于改进活动微结构的性能就非常重要。其中金刚石就是一种优选材料。

纳米相材料简介

● 纳米材料，包括纳米金属、纳米半导体、纳米陶瓷及其他纳米固体材料，与常规的金属、半导体、陶瓷及其他固体材料一样，都是由同样的原子组成的，只是这些原子排列成了纳米级的原子团，成为组成纳米材料的结构粒子或结构单元。

● 常规材料中的基本颗粒的直径小到几微米，大到几 mm，包含几十亿个原子；而纳米材料中的基本颗粒的直径不到 100 nm，包含的原子不到几万个。一个直径 3nm 的原子团，大约包含 900 个原子，几乎是书中个句点的百万分之一，相当于一艘 30 多米长的帆船与地球的比例。

● 纳米材料中基本颗粒的微小尺寸效应，致使材料中的结构颗粒或原子团大多数是不存在位错的，因而大大减少了材料内部的缺陷；因此，纳米材料对机械应力、光、电及磁的反应完全不同于由微米级或 mm 级结构颗粒组成的常规材料，在宏观上表现出异乎寻常的特性。例如，常规的陶瓷脆而易碎，变成纳米相形式后就有了塑性，发生较大形变也不会裂成许多碎片，且可进行切削加工。原因是，nm 级晶粒之间不存在位错；相互之间滑动起来容易形变。又如，纳米相铜的强度比常规相铜的强度高出 5 倍。

纳米相材料的未来

纳米材料是当今世界范围的研究热点，但它的科学史迄今只有 40 余年，尚处在发展的初期。尽管纳米材料涉及的范围很宽，但目前报道较多的，集中在陶瓷材料和金属间化合物方面。随着研究的深入，人们会找到更有效的方法，在原

子级上控制物质的结构，更透彻地了解它们的特性，设计和制造出适应各种需要的纳米材料。纳米相材料在未来的材料技术中将发挥越来越重要的作用。也可以预见，未来的纳米金属材料、电子材料、光子材料及其它固体材料的开发和生产，对于制造高性能的微机电器件、光电器件、传感器件、制动器件、微机电系统以及微机电系统，必将产生深远的影响。

聚合物

八、课后小结

小结本节内容，重点硅材料的特性。

第三章 微机械制造技术

(18 学时)

一、教学目的及要求

了解微机械制造技术，包括硅微机械加工技术（化学腐蚀、离子刻蚀、薄膜生成技术等）、LIGA 技术（LIGA 技术、SLIGA 技术）、特种精密加工技术、固相键合技术等。

二、教学重点及难点

重点：硅微机械加工技术。难点：固相键合技术。

三、教学手段

采用多媒体和板书相结合的手段，多方位阐述。

四、教学方法

课题提问、演示等方法阐明微机械加工技术，讨论表面、体硅微机械加工技术选择方法。

五、作业

布置思考题。

六、参考资料

见参考书。

七、教学内容与教学设计

一、集成电路基本制造技术

光刻、薄膜淀积、掺杂

二、体微加工技术

湿法刻蚀、RIE、DRIE、ICP

三、表面微加工技术

结构层 + 牺牲层、应力、粘连

四、其他微加工技术

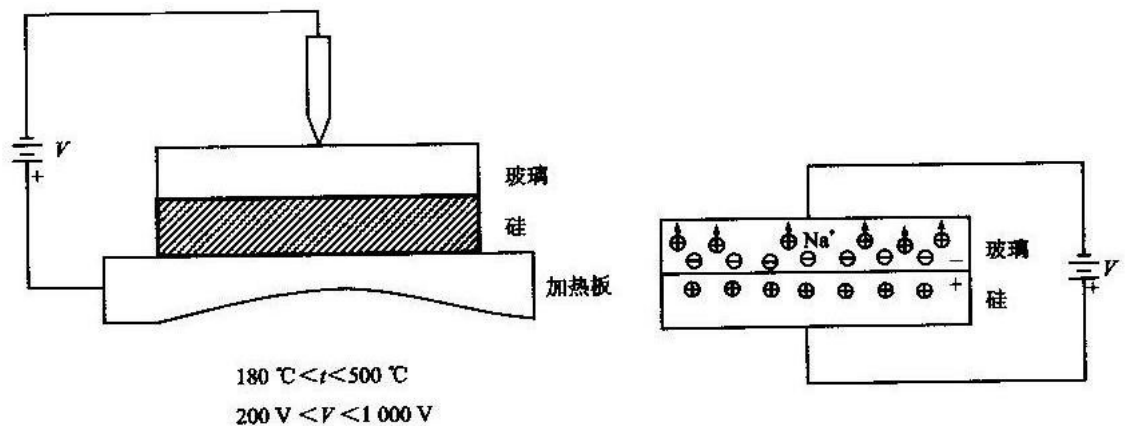
键合技术，也是重要的封装技术。常用的互连材料有硅和硅、金属和硅、玻璃和硅及金属和金属。

技术要求：残余热应力尽可能小；实现机械解耦，以防止外界应力干扰；足够的机械强度和密封性；4、良好的电绝缘性。

分类：

1、 阳极键合

又称为静电键合或场助键合。将硅与玻璃、金属及合金在静电场作用下键合在一起，中间无需任何粘结剂。键合界面具有良好的气密性和长期稳定性。具有键合温度较低，与其他工艺相容性较好，键合强度及稳定度高，键合设备简单等优点。



2、 Si-Si 直接键合

2 块硅片通过高温处理可直接键合在一起，中间无需任何粘结剂和夹层，也无需外加辅助电场。这种技术是将硅晶片加热至 1000 度以上，使其处于熔融状态，分子力导致两硅片键合在一起。它比采用阳极键合优越，因为它可以获得 Si-Si 键合界面，实现材料的热膨胀系数、弹性系数等的最佳配比，得到硅一体化结构。其键合强度可达到硅或绝缘体自身的强度量值，且气密性能好。

但该法的最大缺点是，要实现高强度的键合，形成稳定的原子键，必须施加很高的键合温度，高的温度很难和硅微电子工艺及材料相适应，因此其应用有一定的局限性。

硅-硅直接键合的关键是硅表面的活化处理、表面光洁度、平整度以及在工艺过程中的清洁度。

硅-硅低温键合机理 (120° C)

硅-二氧化硅、二氧化硅-二氧化硅基片的键合

3、 玻璃封接键合

4、 金属共熔键合

LIGA 体微加工技术

深度同步辐射光刻是 LIGA 技术的核心工艺，只有刻蚀出比较理想的抗蚀剂图形，才能保证后续工艺步骤的质量。

超精密机械加工

八、课后小结

小结本节内容，重点体硅和表面硅工艺。

第四章 微传感器

(9 学时)

一、教学目的及要求

了解微传感器的基本物理效应，掌握压力微传感器、加速度微传感器、角速度微传感器（微陀螺）及热式温度微传感器等的基本工作原理及应用。

二、教学重点及难点

重点：传感器的按照探测物理量的分类；压力传感器原理；惯性参数传感器原理；声、电、磁、光、热传感器原理；电化学传感器原理。难点：传感器的特征性能；谐振传感原理；电化学传感器原理等。

三、教学手段

采用多媒体和板书相结合的手段，多方位阐述。

四、教学方法

课题提问、演示等方法阐明微机械传感器技术，讨论微传感器原理及其特点。

五、作业

布置思考题。

六、参考资料

见参考书。

七、教学内容与教学设计

- (一)、概述：微传感器的概念、分类
- (二)、微传感器的一般特性
- (三)、基本敏感原理
- (四)、物理微传感器
- (五)、化学微传感器
- (六)、生物微传感器
- (七)、其它微传感器微机械传感器的应用、发展

(一)、概述：微传感器的概念、分类；

传感器就是“将外界信号转换为电信号的一种装置”；即，传感器就是“外界情报的获取装置”。中国国家标准(GB7665-87)则规定：传感器(transducer/sensor)的定义是：能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可以输出的信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成。

● **微传感器分类：**

由于被测量的千差万别，传感器的种类也有多种多样，分类方式也不尽相同。

● **按传感机理可以分为**

压阻、压电、隧道、电容、谐振、热对流

● **按敏感原理可以分为**

物理传感器

化学传感器

生物传感器

其检测原理分别基于各种物理现象、化学反应和生物效应。

(二)、微传感器的一般特性

1. **静态特性(转换函数)**

分四种情况分析，着重强调无偶次非线性项的情形。

2. **动态特性**

分三种情况，着重分析二阶传感器；阻尼比和共振情形的产生。

(三)、微传感器的敏感原理

压阻效应、电容效应、隧穿效应、压电效应、谐振效应、热效应、光学效应、其它

重点介绍压阻、电容、压电和光学效应敏感原理。难点是光学效应敏感原理。

(四)、物理传感器

物理传感器种类最多，它包括力传感器(如压力传感器、加速度传感器、角速度传感器、微麦克风)等；光传感器(如图像传感器、红外线传感器等)；热传感器(如温度传感器)、声传感器、磁传感器等。

重点介绍力传感器。

(五)、化学传感器

● 化学传感器用来检测特定的化合物。

(六)、生物传感器

生物传感器中，信号敏感部分则含有生命物质(如蛋白质和核酸等)。这些生命物质也称为生物分子识别组件，它们具有分子识别功能，能与被测物质分子发生特异性的相互作用，这些相互作用能通过适当的换能器件转换成可检测的信号。

(七)、其它典型的微传感器-微超声传感器和智能传感器

1、微超声传感器

超声波传播，介质的声阻抗与反射率和投射率的关系。

2、智能传感器

介绍本人的研究成果，让同学们对科研有身临其境的感性认识。培养同学的科研兴趣。

八、课后小结

重点介绍压阻、电容、压电和光学效应敏感原理和力学传感器中压力和角速度传感器。难点是光学效应敏感原理和谐振原理。重点介绍力传感器。

第五章 微执行器

(6 学时)

一、教学目的及要求

了解执行器的几种基本驱动（电、磁、压电、SMA、热等）原理，掌握基于静电效应的变电容（步进、同步）、梳齿结构的工作原理、结构和性能水平及所采用的工艺方法。掌握微泵、微阀、微流量控制系统的工作原理和结构、应用背景，特别是微泵的不同结构种类与不同致动方法；掌握梳状结构的工艺方法、其谐振频率的分析方法。了解其它适当的微执行器应用例证。

二、教学重点及难点

重点：典型执行器的致动原理及结构和制作工艺。难点：结合制作工艺理解微执行器的结构限制；梳状结构固有谐振频率的分析。

三、教学手段

采用多媒体和板书相结合的手段，图、文、声并茂多方位阐述。

四、教学方法

课题提问、演示等方法阐明执行器致动原理及结构和制作工艺，讨论微执行器的结构限制。

五、作业

布置思考题。

六、参考资料

见参考书。

七、教学内容与教学设计

一、定义、研究内容；

微执行器：基于 MEMS 工艺的，能把电信号（电能）磁、热、光、化学等能量转换为机械能或其它形式能量输出的器件，通常由致动元件和传输元件组成。

二、分类

按致动原理分

静电式微执行器

压电式微执行器

电磁式微执行器

形状记忆合金（SMA）微执行器

热微执行器等

三、研究内容及应用

1、静电式微执行器

静电执行器的基本工作原理：两个带异性电荷的电极板之间具有吸引力。

（1）特点

- 结构简单：敏感与执行的原理相对简单，容易实现，仅需两个导电表面即可，无需专门的功能材料；

- 功耗低：静电执行依赖于电压差而非电流，低频时有很高的能效，静态时由于不存在电流这一优点尤其明显；

- 响应快：转换速度由充放电时间常数决定，对于良导体这一时间常数很小，所以可以获得很高的动态响应速度。

（2）偏压作用下静电执行器的平衡位置

平行板执行器的吸合 (pull-in) 效应

（3）静电梳齿驱动

梳状驱动器件的应用

惯性传感器、执行器

2、压电执行器

逆压电效应：在压电材料两端施加一定的电压，材料会表现出一定的形变（伸长或缩短）。

实例

3、形状记忆合金执行器

- 有些材料在受热时，其长度能发生很显著的变化（收缩），将它们总称为形状记忆合金（SMA），其中最著名的是钛镍合金。

- 现象：受到机械力作用而产生变形的合金，一旦受热就会恢复到它们未变形前的状态。

4、电磁微执行器

原理：利用磁场来产生力、力矩、或者微结构的位移。

举例

5、热执行器

● 利用热来驱动的热致动器或简单的加热器（一个电阻器）广泛应用于微机械器件中，是一种十分常见的驱动方式。从原理上分，热致动器可以分为热气动式和热膨胀式两种。

四、典型微执行器——微泵/微阀

国内的主要研究现状及成果

八、课后小结

小结本节内容，重点驱动原理和梳齿结构的工作原理。

第六章 MEMS 封装和测试

(3 学时)

一、教学目的及要求

掌握封装技术的级别、主要封装工艺、封装材料，了解封装新技术。理解 MEMS 检测的一般方法，特别是微弱信号的检测与处理。了解 MEMS 测试最常用的检测方法。

掌握 MEMS 封装技术的级别，

- 1) 芯片级——组装保护微细元件；
- 2) 器件级——包含相应的信号调节和处理；
- 3) 系统级——将多种器件（传感器、执行器和电子器件）封装在一个模块，构成系统。

理解主要封装工艺，了解封装材料，主要有金属、陶瓷、塑料。

了解封装新技术。

倒装焊、球栅阵列、多芯片封装、三维（3D）封装技术

二、教学重点及难点

重点：主要封装工艺；MEMS 检测的常用方法。难点：微弱信号的检测与处理。

三、教学手段

采用多媒体的手段，多方位阐述。

四、教学方法

课题提问、演示等方法阐明微机械加工技术，讨论表面、体硅微机械加工技术选择方法。

五、作业

布置思考题。

六、参考资料

见参考书。

七、教学内容与教学设计

一、MEMS 封装

1、封装设计

MEMS 封装的 3 个级别

- 1) 芯片级——组装保护微细元件；
- 2) 器件级——包含相应的信号调节和处理；
- 3) 系统级——将多种器件（传感器、执行器和电子器件）封装在一个模块，构成系统。

2、封装工艺

理解主要封装工艺，了解封装材料，主要有金属、陶瓷、塑料。

了解封装新技术。倒装焊、球栅阵列、多芯片封装、三维（3D）封装技术

3、封装基片材料

二、MEMS 测试

1、工艺参数测试

- (1) 扫描电子显微镜（SEM）测量
- (2) 原子力测量（AFM）测量
- (3) 残余应力测量

2、器件性能测试

- (1) 激光多普勒测振仪（LDV）
- (2) 频闪显微干涉（SI）测量

介绍本人的研究成果，让同学们对科研有身临其境的感性认识。培养同学的科研兴趣。

八、课后小结

小结本节内容，重点封装和测试方法方法。

第六章 微机电系统设计技术

(3 学时)

一、教学目的及要求

微机电系统设计实例

了解微系统的设计依据：设计约束、材料选择、制造工艺选择、信号变幻和转换、机电设计及封装。

以微压力传感器硅芯片的设计为例，对微机电系统的设计有初步的认识。

二、教学重点及难点

重点：MEMS 设计流程。难点：尺寸效应。

三、教学手段

采用多媒体和板书相结合的手段，图、文、声并茂多方位阐述。

四、教学方法

课题提问、演示等方法阐明微机械加工技术，讨论表面、体硅微机械加工技术选择方法。

课题提问、演示等方法阐明 MEMS 设计流程中的各个模块的内容，讨论系统设计中关键步骤和注意事项。

五、作业

布置思考题。

六、参考资料

见参考书。

七、教学内容与教学设计 MEMS 工艺(13 微系统设计)、微系统设计

硅晶体结构与微观力学

一、微尺度效应

二、MEMS 设计的基本问题

- MEMS 设计不是单个部分设计的简单组合

器件工作原理

器件设计

器件制造方法

产品的结构完整性和可靠性

- MEMS 设计内容

工艺流程设计

机电和结构设计

器件封装好测试等设计验证

(1) 设计约束

技术和非技术:

(2) 材料选择:、(3) 制造工艺:、(4) 信号转换:

(5) 机电系统:、(6) 封装:、(7) 工艺设计:、(8) 力学设计:、(9) 工艺仿真:

三、MEMS 设计的具体方法

八、课后小结

小结本节内容，重点微系统设计过程。

总结（机动 3 学时）