

薄膜传感器

6学时

- 1 薄膜传感器基础
- 2 薄膜温度传感器
- 3 薄膜风速、风向传感器
- 4 薄膜湿度传感器
- 5 薄膜水听器

1. 薄膜传感器基础

1.1 薄膜定义

1.2 薄膜在传感器上的应用

1.3 薄膜功能材料

1.4 薄膜基板材料

1.5 薄膜制备方法

1.6 薄膜加工方法

1.1 薄膜定义

定义:

采用特定的制备方法在基板表面上生长得到的一薄层固态物质。

特点:

基板必不可少

特定的制备方法



区分薄膜、金属膜、塑料薄膜



区分薄膜与厚膜。通常
薄膜 $<1\mu\text{m}$,
厚膜 $>10\mu\text{m}$

1.1 薄膜定义

薄膜
thin film

由物理气相沉积 (PVD)、化学气相沉积 (CVD)、溶液镀膜等薄膜技术制备的薄膜

厚模
thick film

由涂覆在基板表面的悬浮液、膏状物经干燥、煅烧而形成。主要方法：丝网印刷，热喷涂（如：T恤印刷）

1.2 薄膜在传感器上的应用

- (1) 薄膜压力传感器
- (2) 薄膜温度传感器
- (3) 薄膜风速风向传感器
- (4) 薄膜湿度传感器
- (5) 薄膜水听器

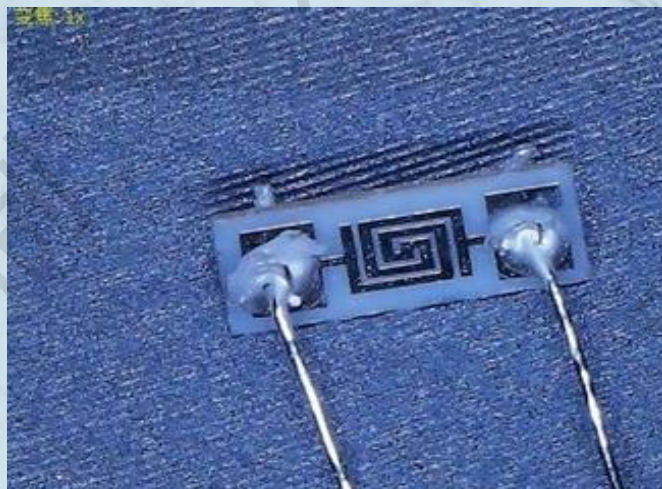
1.3 薄膜功能材料

(1) 薄膜电阻材料：制作薄膜电阻的材料

金属：Cu、Ni、Pt

合金：Ni-Cr（镍铬）、Pt-W（铂钨）

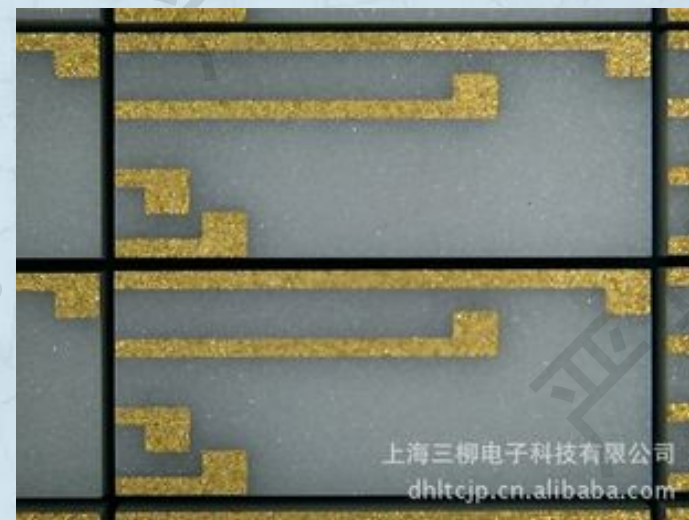
陶瓷： SnO_2 （二氧化锡）、 RuO_2 （二氧化钌liǎo）



1.3 薄膜功能材料

(2) 薄膜导体材料: 信号电极、内引线

Au金导体材料, 有很高的化学稳定性, 因而是薄膜混合电路中常用的高性能导体材料, 实现互联; AL铝、Cu铜廉价导体材料, 薄膜混合电路中最常用的导体材料, 实现互联;

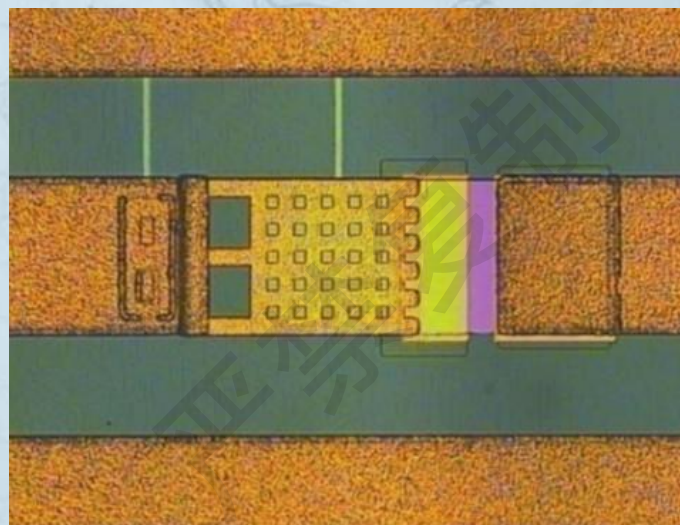
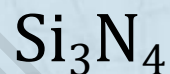


Ag银导体材料, 可以直接与陶瓷基板粘结, 在陶瓷基底器件上应用较多。

1.3 薄膜功能材料

(3) 薄膜绝缘材料：介质隔离层

各个元器件之间、信号线以及电极之间往往需要进行电绝缘体——隔离。常用的隔离技术有pn结隔离和介质隔离等。介质隔离是采用SiO₂膜来实现隔离的，漏电小、耐压高，性能优良，但是工艺比较复杂。



1.4 薄膜基板材料

名称

衬底、基板、基片，英文substrate, wafer

材料

- 氧化铝陶瓷
- 蓝宝石晶体
- 氮化铝陶瓷
- 石英晶体
- 玻璃
- 半导体单晶硅



作用

支撑、绝缘、提供生长模板等

1.5 薄膜制备方法

一、定义

薄膜制备方法，也称作薄膜生长技术。薄膜生长是利用气相沉积或液相沉积等技术，使材料一原子或分子的形式沉积在基底表面，逐渐形成一层薄膜。薄膜生长技术有很多，不同作用、不同位置的薄膜生长技术不同，总的来说可以分为物理方法和化学方法。常见的薄膜生长技术包括：热氧化法、物理气相沉积和化学气相沉积。

1.5 薄膜制备方法

二、薄膜的主要分类

半导体薄膜：主要用于制备源/漏极的沟道区、单晶外延层和MOS 栅极等。

介质薄膜：主要用于浅槽隔离、栅氧化层、侧墙、阻挡层、金属层前介质层，后段的金属层间介质层、刻蚀停止层、阻挡层、抗反射层、钝化层等，也可以用于硬掩膜。

金属及金属化合物薄膜：金属薄膜主要用于金属栅极、金属层、焊盘，金属化合物薄膜主要用于阻挡层、硬掩膜等。

1.5 薄膜制备方法

三、薄膜制备的重要性

(1) 电子器件制造：在半导体工业中，薄膜生长是制造集成电路和其他电子器件的关键步骤。

(2) 光学涂层：在光学器件中，薄膜生长用于制备抗反射涂层、反射镀膜等，以改善光学性能。

(3) 光伏技术：在太阳能电池中，薄膜生长是制备光敏材料的一部分，用于捕获和转换太阳能。

(4) 保护涂层：薄膜可以用作保护层，防止基底受到腐蚀、氧化或其他环境影响。

(5) 传感器制造：在传感器技术中，特定的薄膜可以用于提高传感器的灵敏度和选择性。

1.5 薄膜制备方法

四、薄膜制备方法



1.5 薄膜制备方法

1. 物理气相沉积技术(**PVD**)是利用热蒸发、离子溅射或辉光放电等物理过程，在基体表面沉积所需薄膜的技术
2. 化学气相沉积技术(**CVD**)是利用化学反应，将气相中的物质转移到基体表面形成所需薄膜的技术
3. 物理与化学相结合，以技术方法区分。例如：氧化物、氮化物的制备。

1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法（PVD）

（一）、物理气相沉积法

利用物理过程，实现物质从源到薄膜的转移。

特点：

- 1. 固态或熔融态作源物质
- 2. 经过物理过程转移
- 3. 较高真空度
- 4. 没有化学反应

优点：成膜速度快 $0.1 - 50 \mu\text{m}/\text{min}$ ，

设备比较简单，容易操作；制得薄膜纯度高；薄膜生长机理较简单

缺点：薄膜附着力较小，结晶不够完善，工艺重复性不够好

结构：真空室；蒸发源；基板；基板加热器及温度计

1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法（PVD）

(1) 真空蒸镀

①真空蒸发沉积原理

在真空环境下，给待蒸发物质提供足够的热量以获得蒸发所必须的蒸汽压，在适当的温度下，蒸发粒子在基片上凝结形成薄膜。

真空蒸发就是利用蒸发材料在高温时所具有的饱和蒸汽压进行薄膜制备。

1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法（PVD）

（1）真空蒸镀

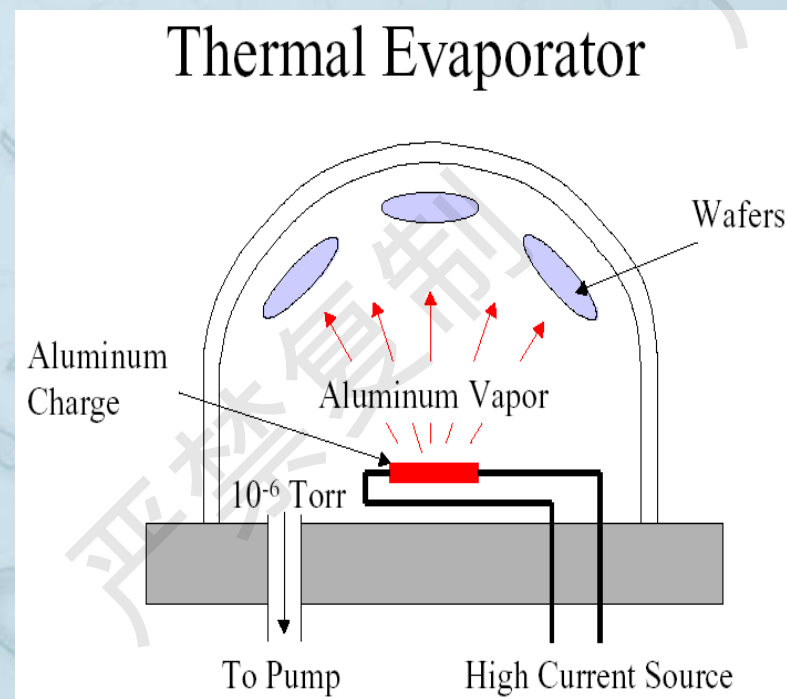
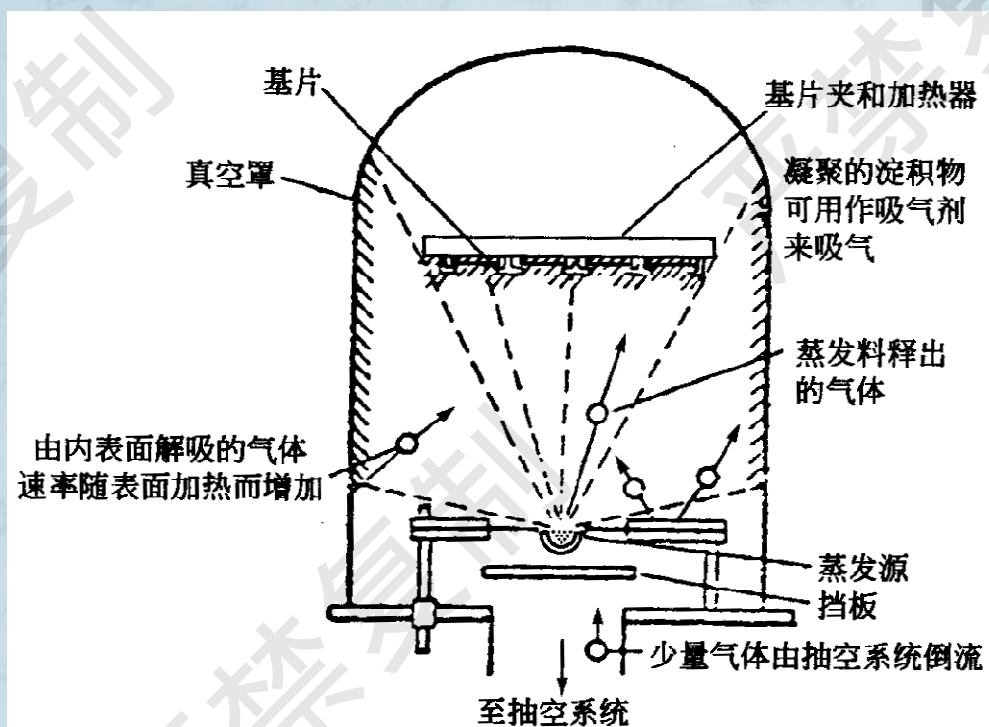
真空蒸发制备薄膜的三个基本过程：

- 1.加热蒸发过程：**对蒸发源加热，使其温度接近或达到蒸发材料的熔点，蒸发源材料由凝聚相转变成气相
- 2.气化原子或分子在蒸发源与基片之间的输运过程。**在这一过程中，原子或分子与真空室内的残余气体分子碰撞
- 3.被蒸发的原子或分子在衬底表面的沉积过程。**原子或分子到达基片后凝结、成核、生长、成膜

1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法 (PVD)

淀积过程

- ①蒸发：加热蒸发源（固态），产生蒸气；
- ②输运：气化的原子、分子扩散到基片表面；
- ③淀积：气化的原子、分子在表面凝聚、成核、成长、成膜；



1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法（PVD）

(1) 真空蒸镀

②真空蒸发设备

真空蒸发设备主要由三部分组成：

1. **真空系统：**为蒸发过程提供真空环境
2. **蒸发系统：**放置蒸发源的装置，以及加热和测温装置
3. **基板及加热系统：**该系统是用来放置衬底，对衬底加热及测温装置

1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法 (PVD)

(1) 真空蒸镀

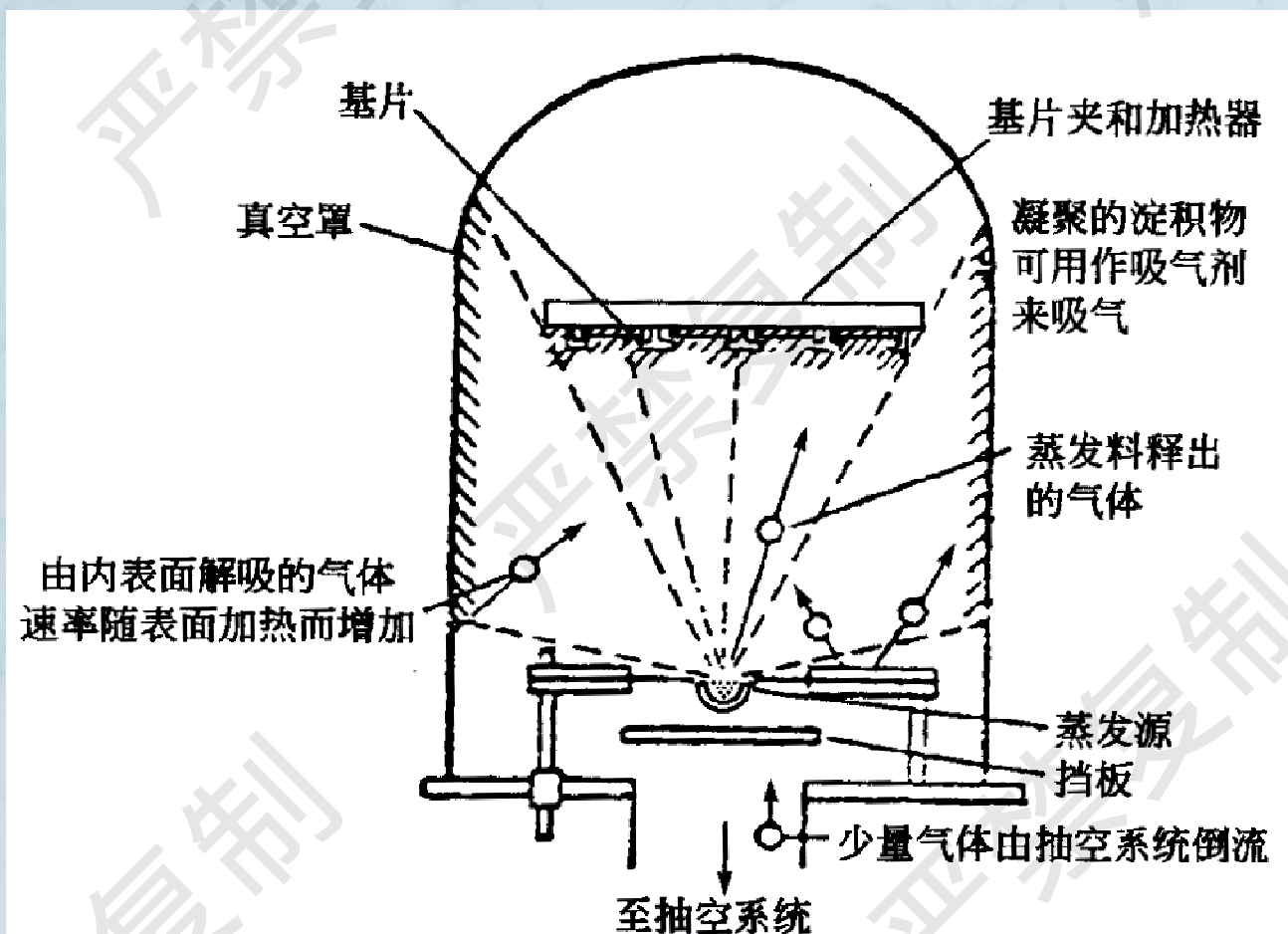


图 5.1 真空蒸发设备示意图

1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法（PVD）

真空镀膜机



1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法（PVD）

(1) 真空蒸镀

③真空蒸发加热方式

电阻加热源

电子束加热源

高频感应加热源

激光加热源

1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法 (PVD)

1. 电阻蒸发

蒸发源材料的要求---W, Mo

- 1) 熔点要高;
- 2) 饱和蒸气压低, 减少蒸发源材料蒸气的污染;
- 3) 化学性质稳定;
- 4) 耐热性好, 热源变化时, 功率密度变化较小;
- 5) 经济耐用。

1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法（PVD）

2. 电子束蒸发

定义：

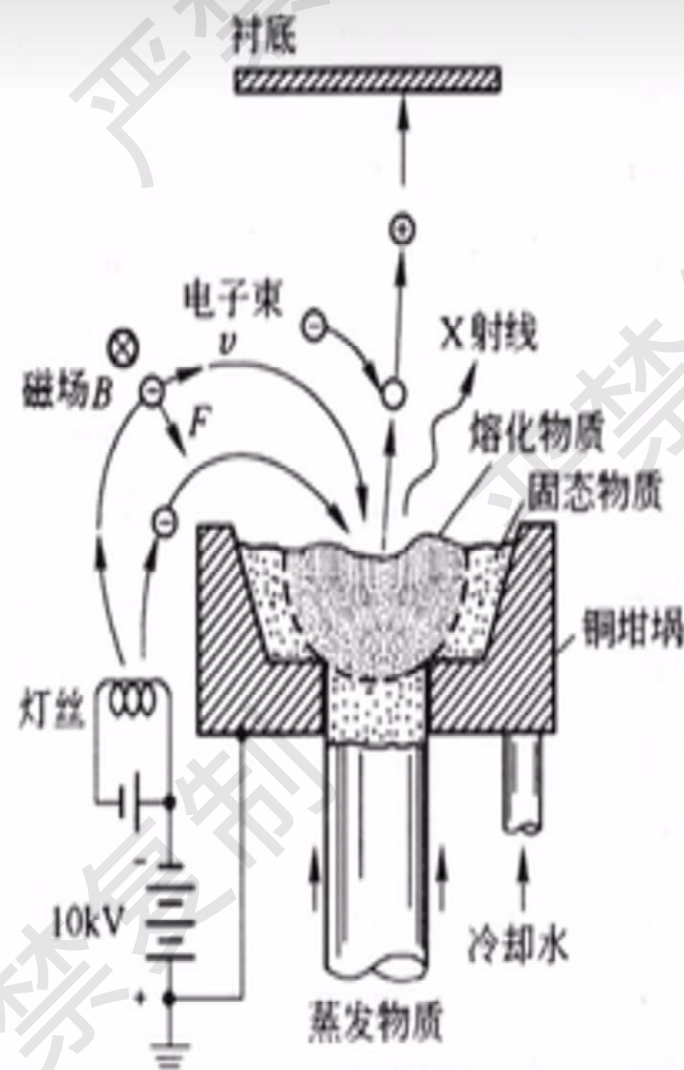
将镀料放入水冷铜坩埚中，利用高能电子束轰击镀料，使其受热蒸发。

优点：

- 1) 基板性能得到提高；
- 2) 涂层致密无缺陷；
- 3) 涂层光亮，富有艺术性。

缺点：

- 1) 源的位置只能在系统的底部；
- 2) 设置较为复杂；
- 3) 需要额外工艺改善附着力；
- 4) 受坩埚体积限制；
- 5) 容易飞溅，影响表面特性。



1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法（PVD）

3. 高频感应蒸发

原理：

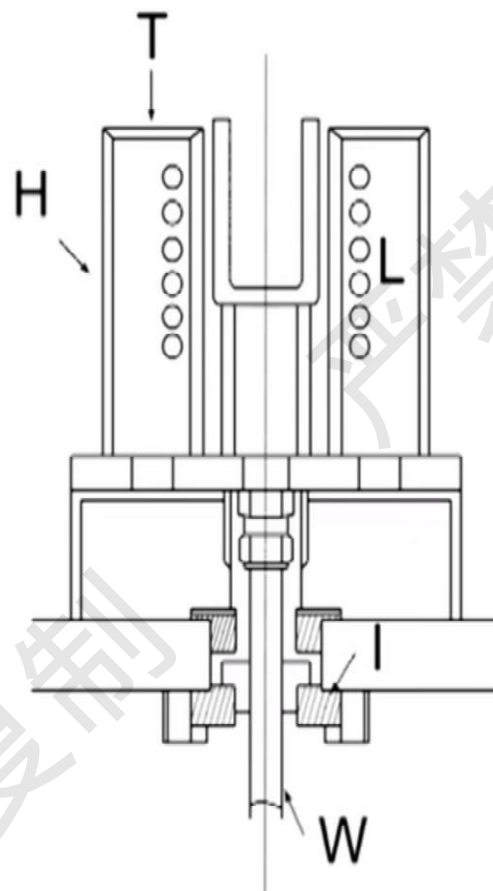
将镀料放在坩埚中，坩埚放在高频螺旋线圈的中央，使镀料在高频电磁场的感应下产生涡流损失和磁滞损失（对铁磁体）而升温蒸发。

优点：

- 1) 蒸发速率大，可比电阻蒸发源大10倍左右；
- 2) 蒸发源的温度均匀稳定，不易产生飞溅现象；
- 3) 镀料是金属时可自身产生热量，坩埚可选用与蒸发材料反应最小的材料。

缺点：

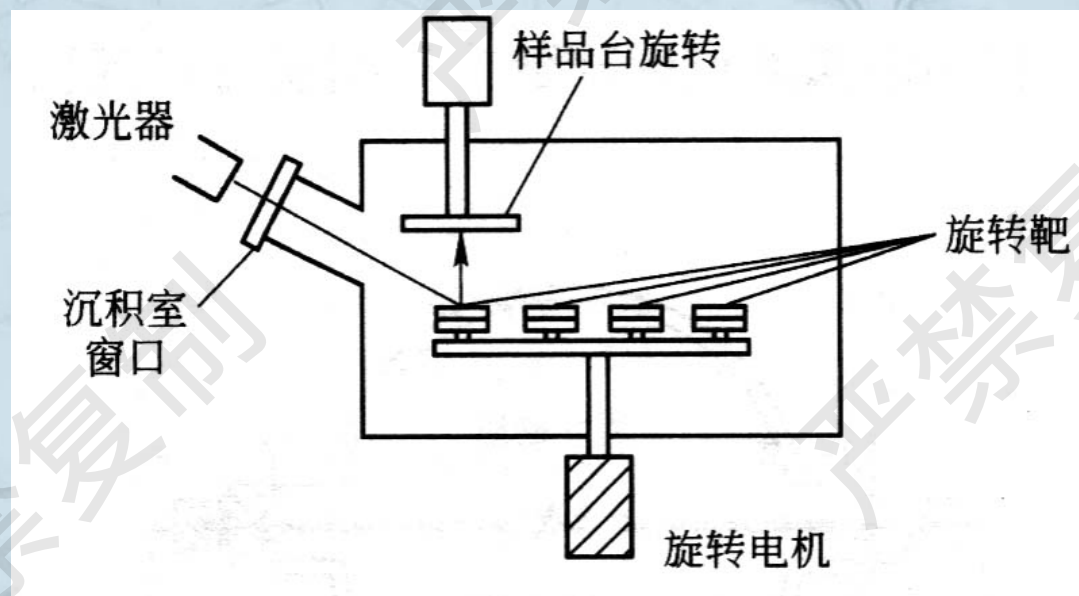
- 1) 蒸发装置必须屏蔽，否则会对通讯产生影响；
- 2) 线圈附近压强超过 10^{-2}Pa 时，高频电场会使残余气体电离；
- 3) 高频发生器昂贵。



1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法（PVD）

4、激光加热蒸发

- ◇ 利用激光作为热源使待蒸发材料蒸发。
- ◇ 激光蒸发属于在高真空条件下制备薄膜的技术。激光源放在真空室外边，激光束通过真空室窗口打到待蒸发材料上使其蒸发，沉积在衬底上。
- ◇ 适合制备高纯，难熔物质薄膜



1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法（PVD）

4、激光加热蒸发

- ◇ 可用来制备光学薄膜 Sb_2S_3 （硫化锑）， ZnTe （碲化锌）， MoO_3 ， PbTe ， Ge （锗）， Si
- ◇ 制备陶瓷薄膜： Al_2O_3 ， Si_3N_4 ，
- ◇ 氧化物薄膜： SnO_2 ， ZnO
- ◇ 超导薄膜YBCO

注： Sb （锑）， Te （碲）， Ge （锗）

1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法（PVD）

（2）溅射工艺

- ◆ 原理：气体辉光放电产生**等离子体**→具有能量的离子轰击靶材→靶材原子获得能量从靶表面逸出-被溅射出→溅射原子淀积在表面。

什么是等离子体？——物质的“第四态”

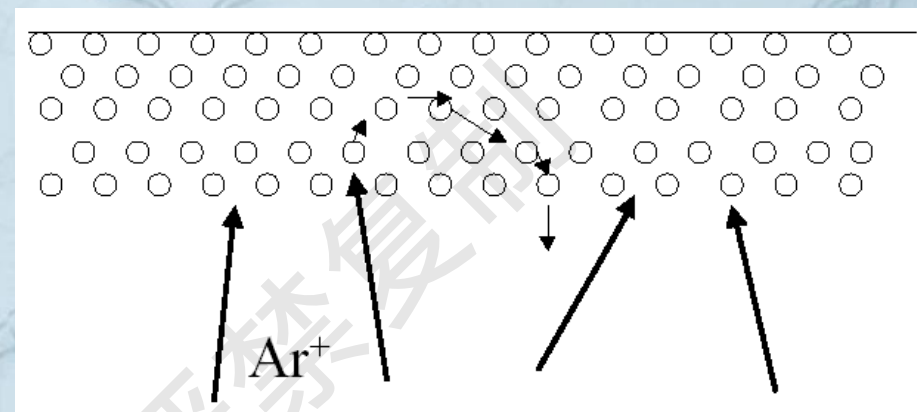
水的四种状态

- 1) 冰，此时其微观基本组元（分子）的热运动动能小于组元之间的相互作用势能，因而相互束缚，在空间的相对位置固定，是**固体状态**
- 2) 水，分子热运动能与分子间相互作用势能相当。分子可以自由地移动，但在边界面上大多数分子还不能可以克服表面束缚能，因而存在一个明显的表面，是**液体状态**
- 3) 蒸汽，分子热运动能克服分子间的相互作用势垒，包括表面的束缚能，分子因此变成彼此自由的个体，它们将占据最大可能占据的空间，是**气体状态**
- 4) 当温度增高到使原子（分子）间热运动动能与电离能相当的时候，变成（部分）电离气体，系统的基本组元变成了离子和电子（可包含大量的原子和分子）。电磁力开始作用，这就是**等离子体状态**。

1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法（PVD）

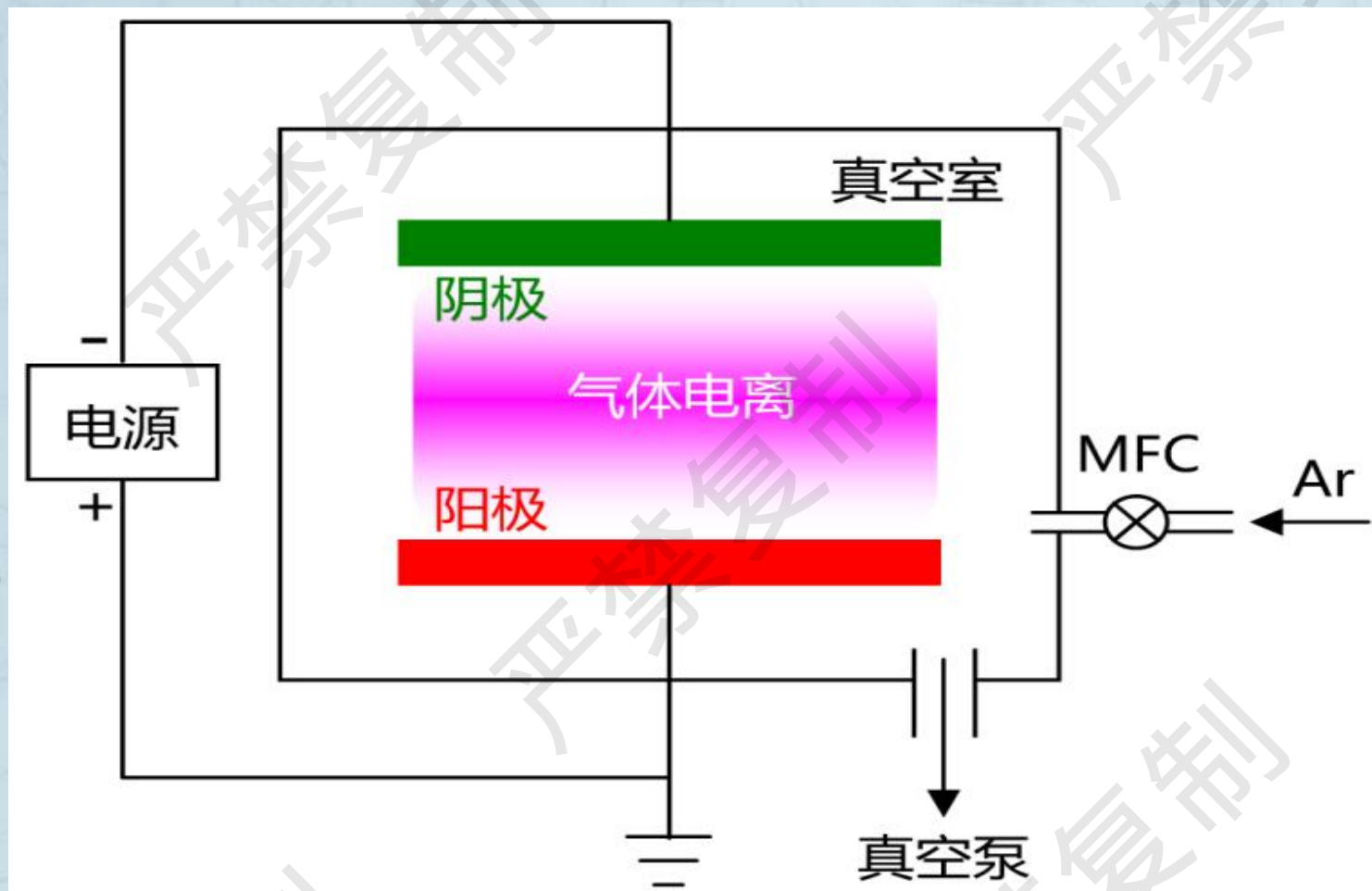
（2）溅射工艺

- ◆ 原理：气体辉光放电产生**等离子体**→具有能量的离子轰击靶材→靶材原子获得能量从靶表面逸出-被溅射出→溅射原子淀积在表面。
- ◆ 特点：被溅射出的原子动能很大，10–50eV（蒸发：0.1–0.2eV）；还可实现离子注入。
- ◆ 优点：迁移能力强



Ar⁺离子能量和动量转移将使表面原子脱离化学键束缚

1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法（PVD）



最简单的二极直流辉光放电系统

1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法（PVD）

溅射方法

- ◆ 直流、射频、磁控、反应、离子束等溅射；

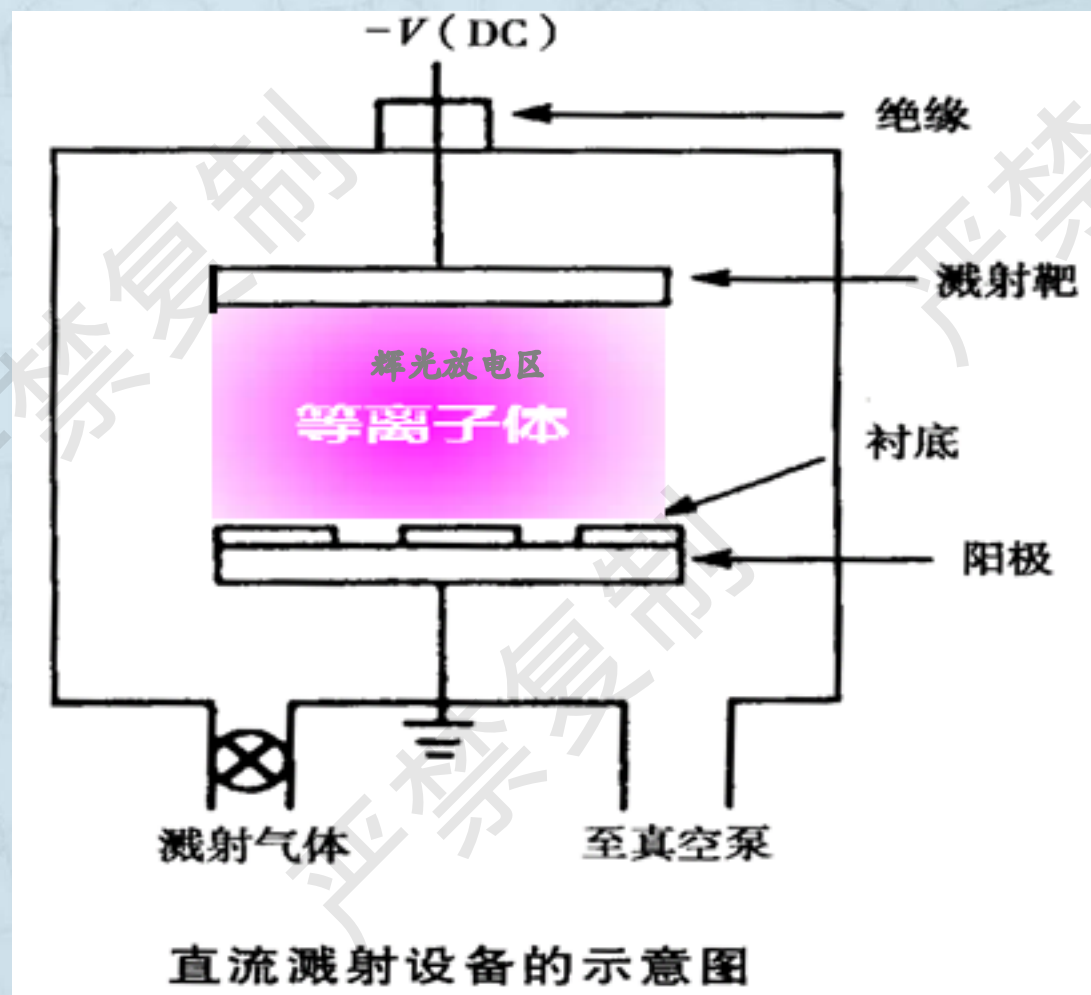
- ◆ 溅射靶：阴极

- ◆ 衬底：阳极（接地）

- ◆ 工作气体：Ar气

- ◆ 要求：靶材导电性好

- ◆ 特点：只适于金属靶材



1.5 薄膜制备方法—物理气相沉积法（PVD）

磁控（射频）溅射台



1.5 薄膜制备方法—化学气相沉积法 (CVD)

(二)、化学气相沉积法

化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD) , 利用加热、等离子激励或光辐射等各种能源, 在反应器内使气态或蒸汽状态的化学物质在气相或气固界面上经化学反应形成固态沉积物的技术。

简单来说就是: 两种或两种以上的气态原材料导入到一个反应室内, 然后他们相互之间发生化学反应, 形成一种新的材料, 沉积到基片表面上。

从气相中析出的固体的形态主要有以下几种: 在固体表面上生成薄膜、晶须和晶粒, 在气体中生成粒子。

1.5 薄膜制备方法—化学气相沉积法 (CVD)

CVD技术的分类

- CVD技术根据反应类型或者压力可分为

低压CVD (LPCVD)

常压CVD (APCVD)

亚常压CVD (SACVD)

超高真空CVD (UHCVD)

等离子体增强CVD (PECVD)

高密度等离子体CVD (HDPCVD)

快热CVD (RTCVD)

金属有机物CVD (MOCVD)

CVD技术

1.5 薄膜制备方法—化学气相沉积法（CVD）

低压CVD装置（LPCVD）



- 低总压、高分压
- 通常是表面反应限制机制

优点：

- 中等反应速率
- 均匀性好
- 台阶覆盖度好
- 缺陷浓度低, 污染少
- 高产率

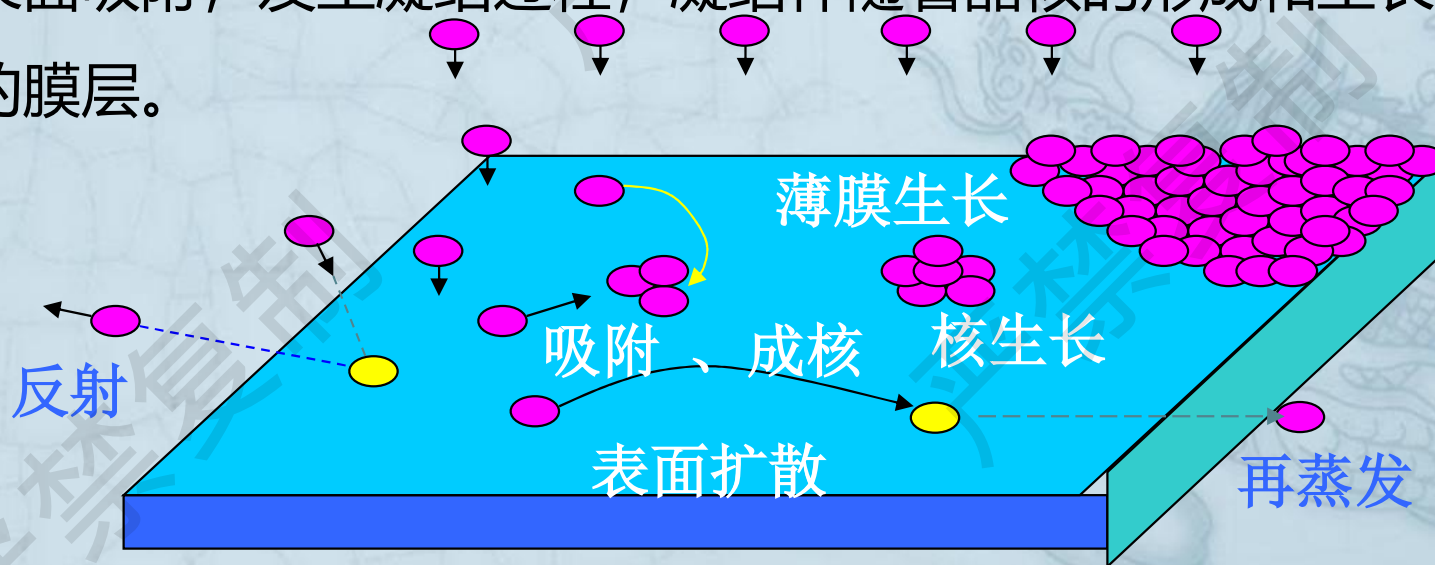
1.5 薄膜制备方法—薄膜生长方式（成膜工艺）

五、薄膜的生长方式

薄膜的形成过程实质上是气—固转化，晶体形成的过程，直接影响着薄膜的结构以及最终的性能。

溅射薄膜生长过程：

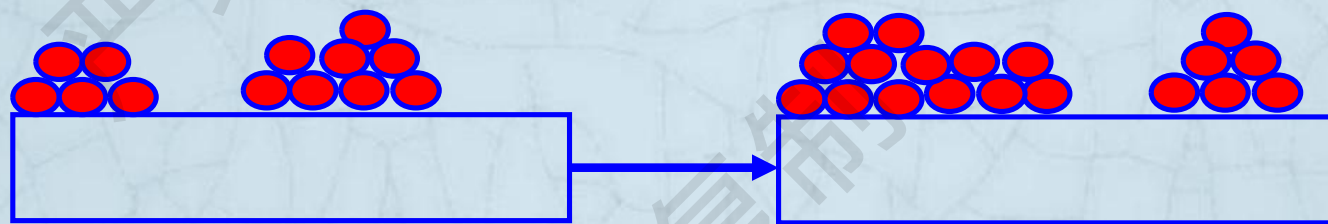
薄膜材料粒子（原子或分子）撞击衬底表面，被衬底表面的原子所吸附或者反射，被吸附的粒子在自身所带能量或基底温度提供能量的作用下，发生表面扩散或表面迁移，一部分再蒸发，脱离表面，一部分落入势能谷底，被表面吸附，发生凝结过程，凝结伴随着晶核的形成和生长，最后形成连续的膜层。



1.5 薄膜制备方法—薄膜生长方式（成膜工艺）

薄膜形成和生长的3种模式：

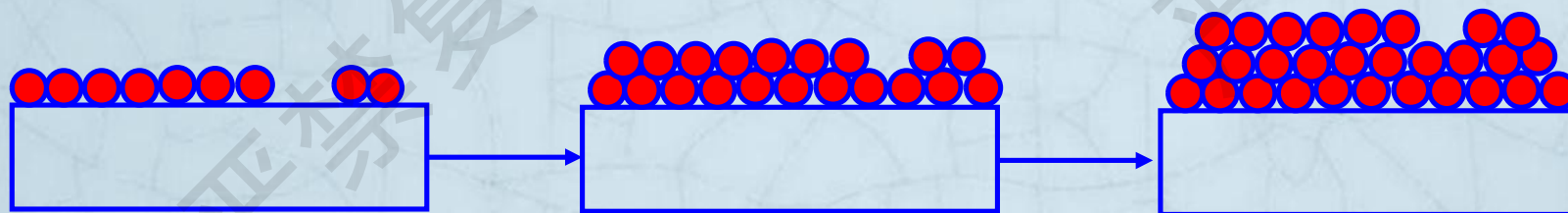
(1) 岛状生长模式



- 对很多薄膜与衬底的组合来说，只要沉积温度足够高，沉积原子具有一定的扩散能力，薄膜生长就表现为岛状生长模式。
- 金属在非金属衬底上多为此种生长模式。

1.5 薄膜制备方法—薄膜生长方式（成膜工艺）

（2）层状生长模式



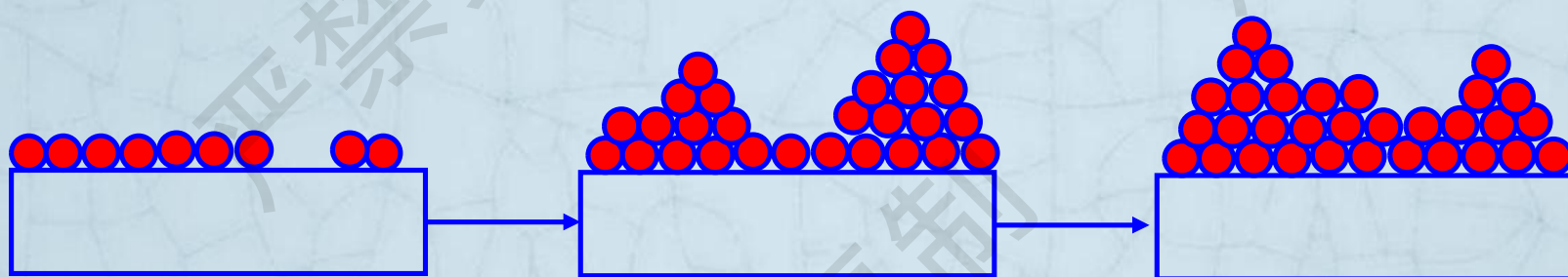
沉积物与衬底浸润性很好，被沉积原子更倾向于和衬底原子键合。薄膜从形核开始阶段即采取二维扩展模式，并在随后的沉积过程中一直维持这种生长模式。

通常在以下条件下多出现此生长模式：

组成薄膜的物质同基板的物质具有相似的化学性质，基板表面清洁、平整光滑，沉积温度高等。

1.5 薄膜制备方法—薄膜生长方式（成膜工艺）

(3) 先层状后岛状的复合生长模式



最开始的一两个原子层的层状生长之后，生长模式从层状模式转变为岛状模式。这种转变的物理机制比较复杂。

1.6 薄膜加工工艺—光刻与刻蚀工艺

薄膜工艺制造中最重要的工艺：

- ①决定着芯片的最小特征尺寸；
- ②占芯片制造时间的40-50%；
- ③占制造成本的30%

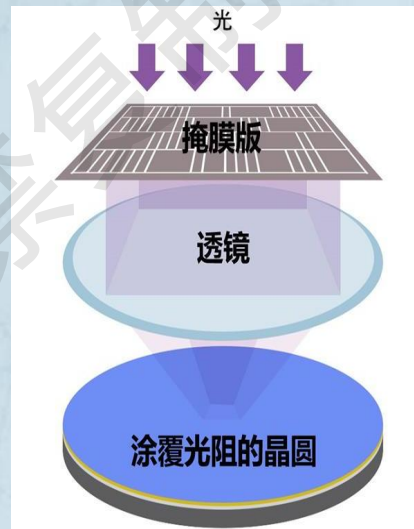
◆ **光刻：**通过光化学反应，将光刻版上的图形转移到光刻胶上

◆ **刻蚀：**通过腐蚀，将光刻胶上图形完整地转移到基片上

◆ **光刻三要素：**①光刻机 ②光刻版 ③光刻胶

1.6 薄膜加工工艺—光刻与刻蚀工艺

光刻工艺



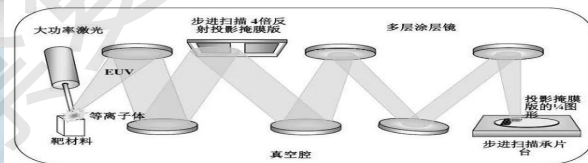
半导体行业“皇冠上的明珠”，光刻机的本质其实与投影仪+照相机差不多，以光为刀，将设计好的电路图投射到硅片之上。

Intel创始人戈登·摩尔提出，微电子产业规范-每18个月集成度翻番（单个芯片集成的晶体管数目翻翻），迄今发展40年仍有效。

国外荷兰的阿斯麦EUV光刻机实现5nm、7nm工艺（1亿欧元）。上海微电子装备公司光刻机90nm。



极紫外光刻技术示意图

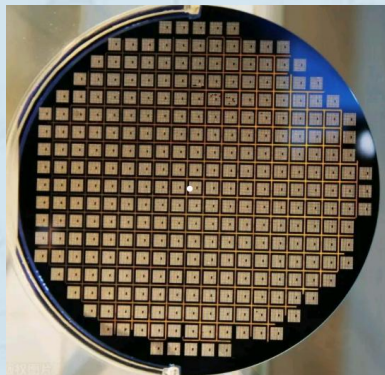


1.6 薄膜加工工艺—光刻与刻蚀工艺

(1) 光刻版（掩模版）

基版材料

- 玻璃、石英。
- 要求：透光度高，热膨胀系数与掩膜材料匹配。



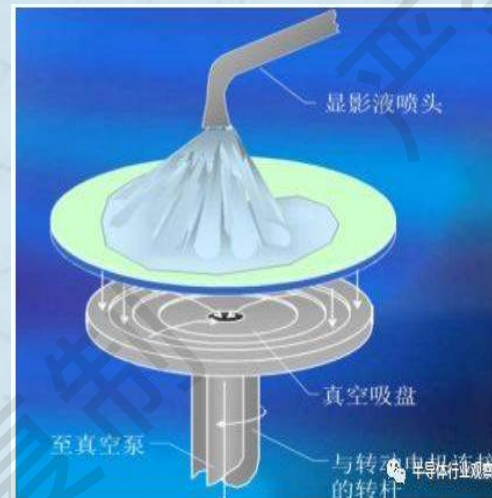
掩膜材料

- ①金属版（Cr版）： Cr_2O_3 抗反射层/金属Cr / Cr_2O_3 基层
 - 特点：针孔少，强度高，分辨率高。
- ②乳胶版—卤化银乳胶
 - 特点：分辨率低（2 - 3 μm ），易划伤。

1.6 薄膜加工工艺—光刻与刻蚀工艺

(2) 光刻胶

- 光敏性材料：光照时发生化学分解或聚合反应
- 通过曝光转移设计图形到光刻胶上
- 类似于照相机胶片上涂覆的光敏材料
- 正性胶和负性胶



负性光刻胶—负胶	正性光刻胶—正胶
曝光后 不可溶解	曝光后 可溶解
显影时未曝光的被 溶解	显影时曝光的被溶 解
便宜	高分辨率

1.6 薄膜加工工艺—光刻与刻蚀工艺

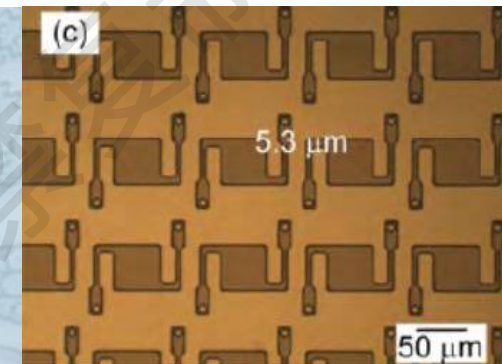
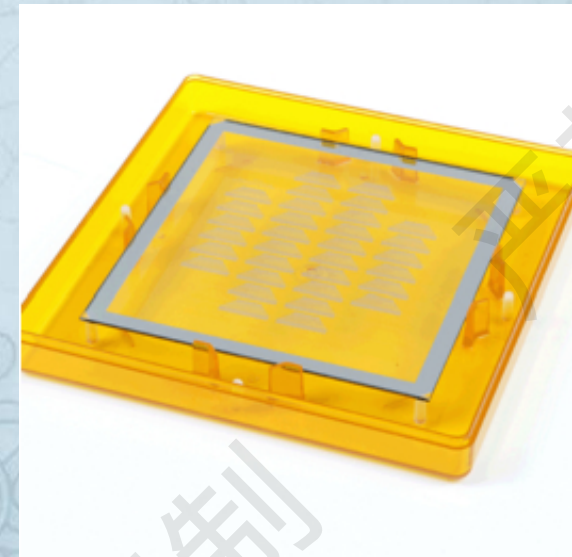
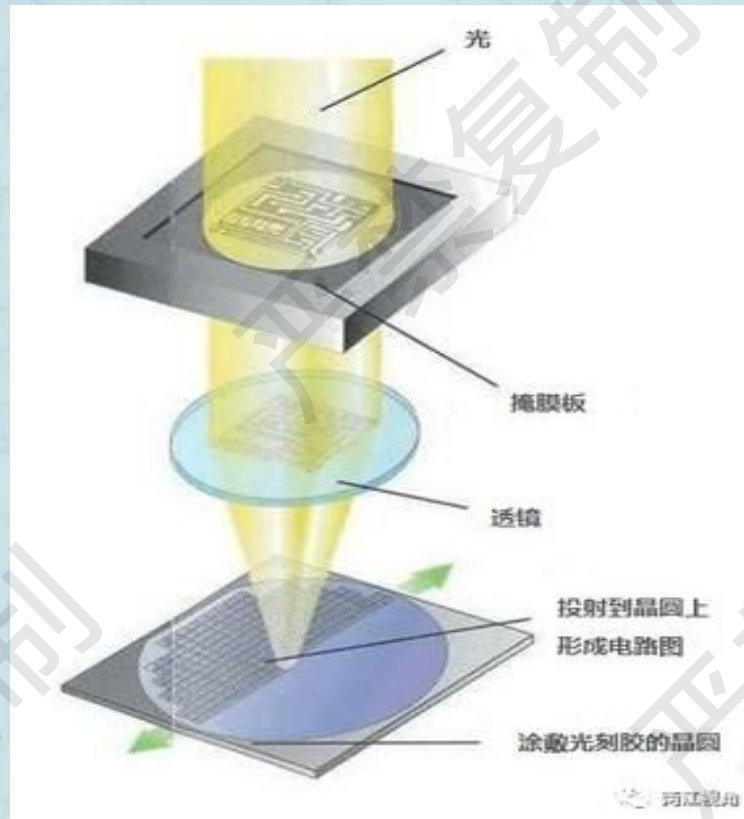
光刻是在基片上形成一个掩膜层图形，是利用光刻胶的光化学反应制得，目的是去除薄膜中的特定部分，通过光刻工艺过程，最终在基片（晶圆）上保留特征图形的部分。

光刻工艺步骤

涂胶 前烘

曝光 后烘

显影 坚膜



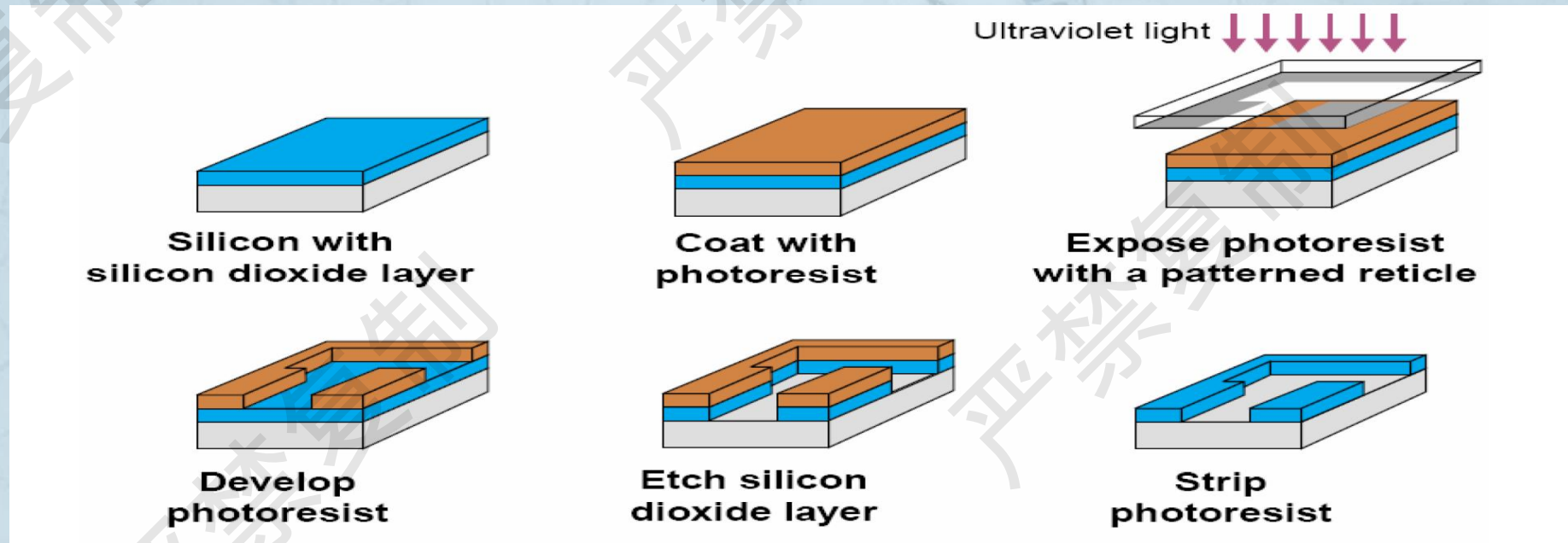
1.6 薄膜加工工艺—光刻与刻蚀工艺

(3) 刻蚀工艺

通过物理和/或化学方法将下层材料中没有被上层掩蔽膜材料掩蔽的部分去掉，从而在下层材料上获得与掩蔽膜图形完全对应的图形。

物理刻蚀：激光刻蚀、离子束刻蚀、等离子刻蚀

化学刻蚀：酸溶液腐蚀刻蚀、碱溶液腐蚀刻蚀、反应离子刻蚀



1.6 薄膜加工工艺—光刻与刻蚀工艺

薄膜技术

薄膜制备、测试等相关技术的总称为薄膜技术。薄膜是将一种特殊的物质形态，在厚度特定方向上尺寸只有微观可测的量，但是在厚度上由于表面、界面存在，使物质连续性发生中断，让薄膜材料与块状材料产生不同的特性。

电阻温度系数：温度每升高 1°C 时，电阻率的增加量与原来的电阻率的比值，通常以字母 α 表示，单位为 $1/^{\circ}\text{C}$ 。

铂丝0.00392，铂膜0.00385

2 薄膜温度传感器

(1) 热膜敏感电阻工作原理

热敏电阻由铂膜电阻构成，铂膜电阻是跟据其阻值随温度的增加成正比例近似线性增大的原理而研制的。薄膜温度系数与厚度有关。

(2) 技术指标特点

线性好、耐高温、耐腐蚀、稳定性好。

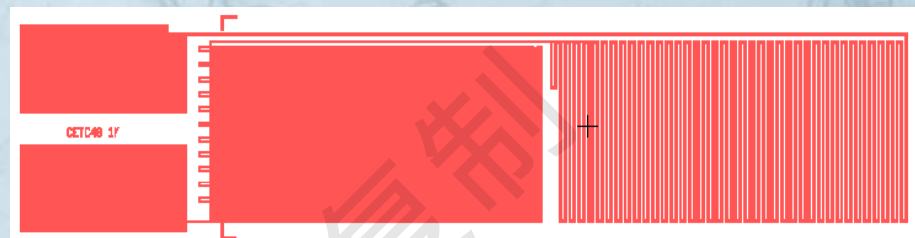
$$TCR = \alpha = \alpha_n [1 / (1 + 3\lambda / 8d)]$$

λ —电子平均自由层

d —薄膜厚度

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2)$$

$$R_t = R_0[1 + \alpha(t_1 - t_0)]$$



2 薄膜温度传感器

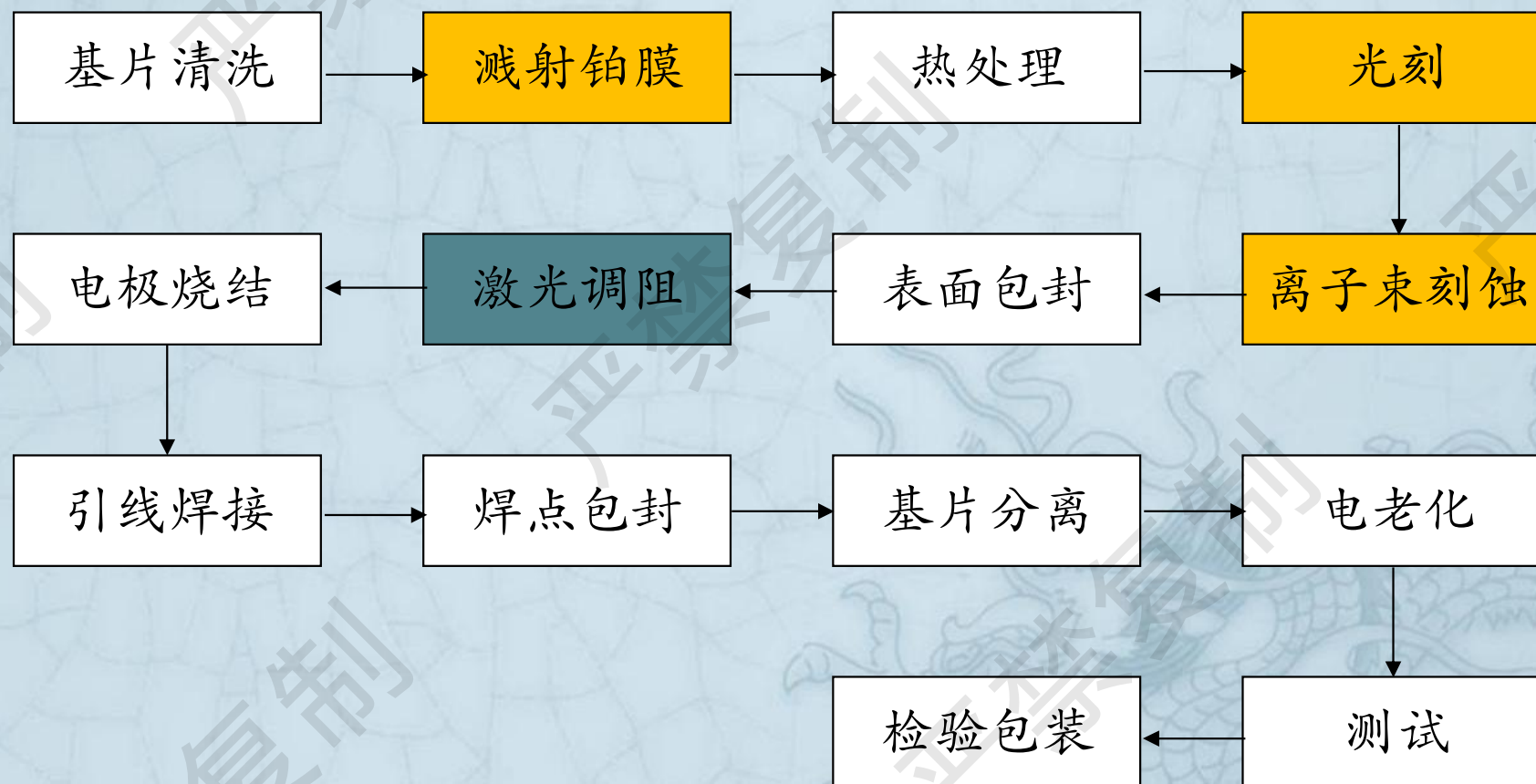


直流溅射成膜工艺

形成Pt膜-1-2um

2 薄膜温度传感器

工艺流程



2 薄膜温度传感器



直流溅射成膜工艺

形成Pt膜-1-2um

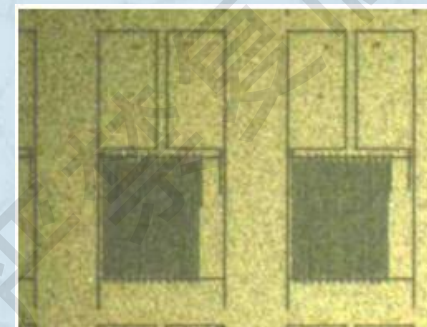
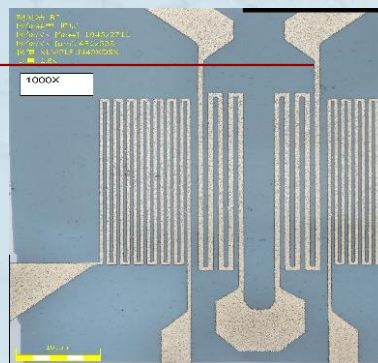
2 薄膜温度传感器



热处理工艺（烧结炉）

Pt膜稳定化-消除Pt膜种缺陷

2 薄膜温度传感器



光刻



离子束刻蚀



紫外激光刻蚀

形成Pt膜电阻条图形

2 薄膜温度传感器



全自动热电阻检测系统



一等标准铂电阻

3 薄膜风速、风向传感器

一、分类



风扇式风速传感器



风杯式风速传感器

3 薄膜风速、风向传感器



3 薄膜风速、风向传感器

风速传感器结构设计注意事项

阻塞效应：当热式气体风速传感器的探头测量插入风场后，将引起管道流通面积减小及速度畸变，称为阻塞效应。

探头的尺寸越大，阻塞效应越明显，在测量时对风场和风速影响越大，测量结果误差会越大，所以测量结果要进行阻塞误差的修正。

探头与空气的接触面积越大，热传递量越大，传感器灵敏度越高，但探头直径也会越大。所以在探头结构设计时，需要合理地设计探头尺寸。

3 薄膜风速、风向传感器

二、薄膜风速传感器

薄膜风速传感器基底材料

基底材料的物理特性参数

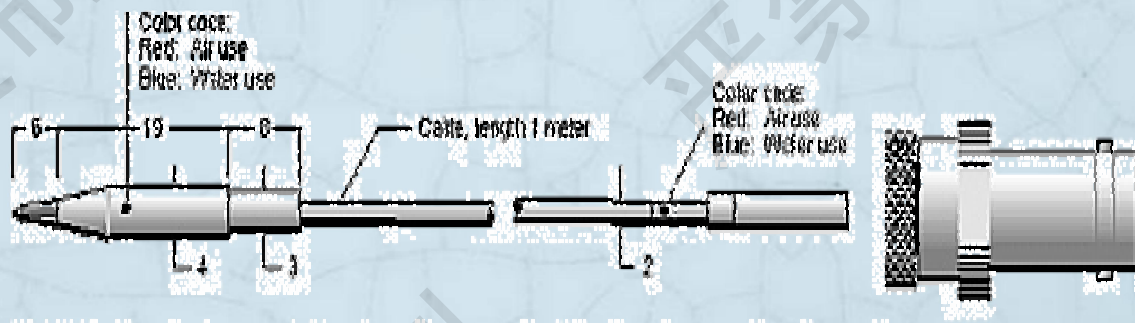
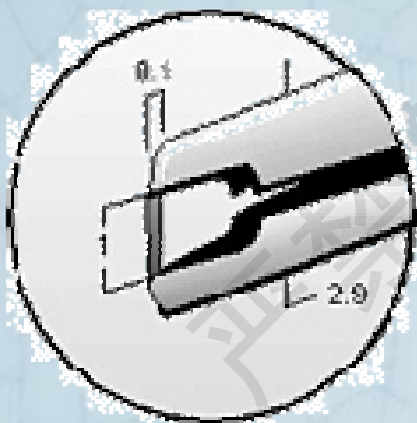
名称	比重 (在 20℃)	线膨胀系数 $\alpha \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	导热系数 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{k}$)	适用温度 ($^{\circ}\text{C}$)
石英玻璃	2~2.2	0.5	1.54~1.63	≤ 950
有机玻璃	1.18~1.19	60~130	0.14~0.2	-30~40
Al_2O_3 96%		7~8	12	
AlN	3.235	4.5	320	
玻璃钢 FRP	1.7~1.9	7~10	0.288	-30~150

薄膜风速传感器敏感材料

Pt20	气体流量传感器
	风速传感器

Pt20

3 薄膜风速、风向传感器



热膜风速芯片

Pt20



3 薄膜风速、风向传感器

二、薄膜风速传感器

(1) 热膜风速传感器测量原理

热膜风速传感器, 风速标量测量的基本思想是通过测量流体中热源热量的损失速率来间接测量流体的流速。

热式风速传感器的测量原理是建立在热量守恒基础之上使用电流对强迫对流中的加热源金属膜进行加热, 金属膜发热量等于自身热量的增加量和热传导、对流、辐射损失热量的总和。

测量时保持加热金属膜的温度不变的状态叫做热平衡状态, 温度不变时, 金属膜自身的热量基本不变化, 发热量主要是热传导、对流、辐射损失热量的总和。

3 薄膜风速、风向传感器

(2) 热膜风速传感器数学模型

将通电加热热膜置于被测环境中，热膜与被测气体之间将以传导、辐射和对流这三种方式进行热交换。该系统的热平衡方程：

$$H = Q_c + Q_k + Q_f$$

H 为电流加热热量值； Q_c 为对流换热量； Q_k 为导热热量； Q_f 为辐射热量。

3 薄膜风速、风向传感器

热膜风速计是**利用通电的热膜探头在流场中会产生热量损失来进行测量的**。如果流过热膜的电流为 I_s ，热膜温度为 T_s ，热膜的电阻为 R_s ，则单位时间热膜产生的热量是：

$$Q_1 = I_s^2 R_s$$

当热膜探头置于流场中，运动的空气对热膜有冷却作用，假设风速 F 使热膜温度由原来的 T_s 降到 T_e 。**根据牛顿冷却定律公式，单位时间热膜散失的热量**为：

$$Q_2 = (T_s - T_e)(A + B\sqrt{F})$$

根据热平衡原理，有 $Q_1 = Q_2$ ，因此可写出热膜的能量守恒方程

$$I_s^2 R_s = (T_s - T_e)(A + B\sqrt{F})$$

3 薄膜风速、风向传感器

其中

$$R_s = R_e[1 + \alpha(T_s - T_e)]$$

α 为热膜的电阻温度系数； R_e 为温度 T_e 时的热膜电阻。

将

$$T_s - T_e = \frac{R_s - R_e}{\alpha R_e} \rightarrow I_s^2 R_s = (T_s - T_e)(A + B\sqrt{F})$$

$$\frac{I_s^2 \alpha R_e R_s}{R_s - R_e} = A + B\sqrt{F}$$

式中 α , R_e , A , B 皆为常数，可见 I_s , R_s , F 之间存在着明确的函数关系。

3 薄膜风速、风向传感器

(3) 热膜风速传感器的工作模式

若**保持热膜温度不变**(R_s 恒定), 则 $F = f(I_s)$, 加热电流 I_s 的大小与风速 F 呈一定函数关系, 可以通过测量加热电流来测量风速, **恒温工作模式**。

若**保持热膜电流不变**(I_s 恒定)则 $F = f(R_s)$, 即热膜温度(电阻)变化与流量呈一定函数关系, 通过测量温度(电阻)变化来测量流量, **恒流工作模式**。

恒温热膜风速计, 恒流热膜风速计。恒温模式的响应速度比恒流模式快, 在使用上也比恒流模式简单, 故恒温模式在测量中应用较广泛。

3 薄膜风速、风向传感器

1. 当 I_s = 常数,

$$R_s = \frac{-R_e(A + B\sqrt{F})}{I_s^2 \alpha R_e - (A + B\sqrt{F})}$$

$$\frac{I_s^2 \alpha R_e R_s}{R_s - R_e} = A + B\sqrt{F}$$

恒流静态方程, 恒流热膜风速计

2. 当 R_s = 常数,

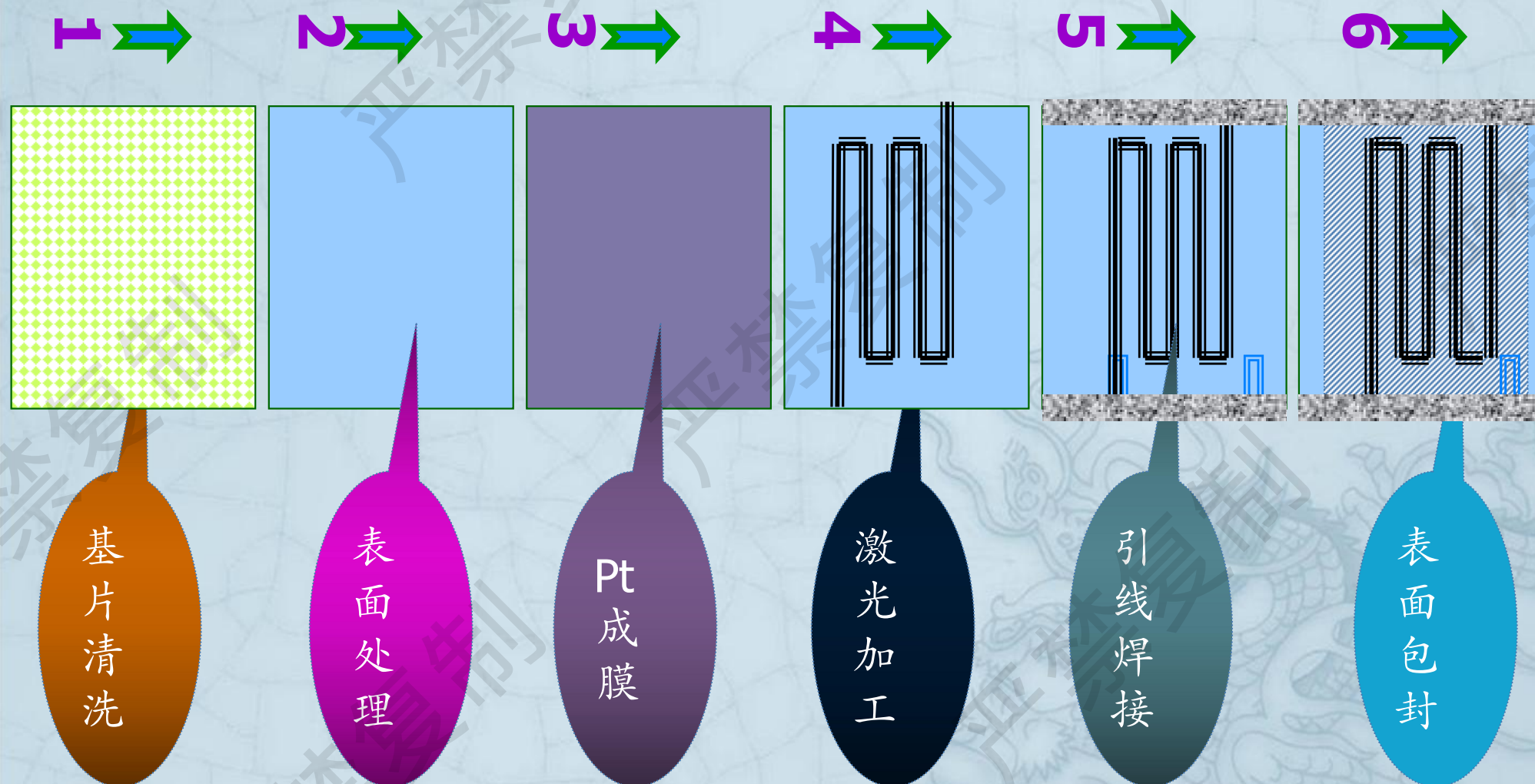
$$I_s = \sqrt{\frac{(R_s - R_e)(A + B\sqrt{F})}{\alpha R_e R_s}}$$

$$\frac{I_s^2 \alpha R_e R_s}{R_s - R_e} = A + B\sqrt{F}$$

恒温静态方程, 恒温热膜风速计

3 薄膜风速、风向传感器

(4) 热膜风速传感器制造工艺



3 薄膜风速、风向传感器

(5) 风速传感器标定



风洞

3 薄膜风速、风向传感器

三、薄膜风向传感器

(1) 风向的测量原理

从风速标量的测量方法可知，由于强迫对流和气体热传递，从加热中心开始的下风口气流温度会发生不同程度的上升。这时气体温度最大梯度的方向就是风速的方向。



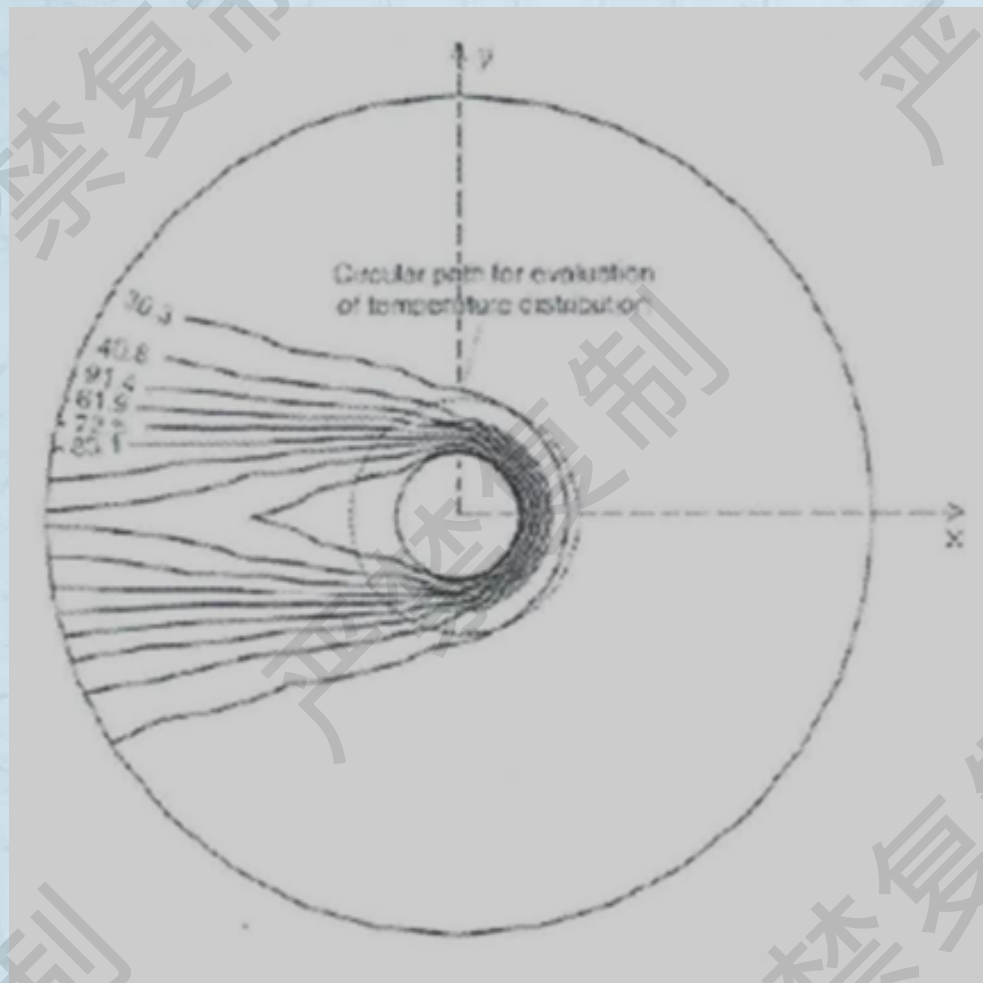
3 薄膜风速、风向传感器

风向的测量原理

从风速标量的测量方法可知，由于强迫对流和气体热传递，从加热中心开始的下风口气流温度会发生不同程度的上升。这时**气体温度最大梯度的方向就是风速的方向。**

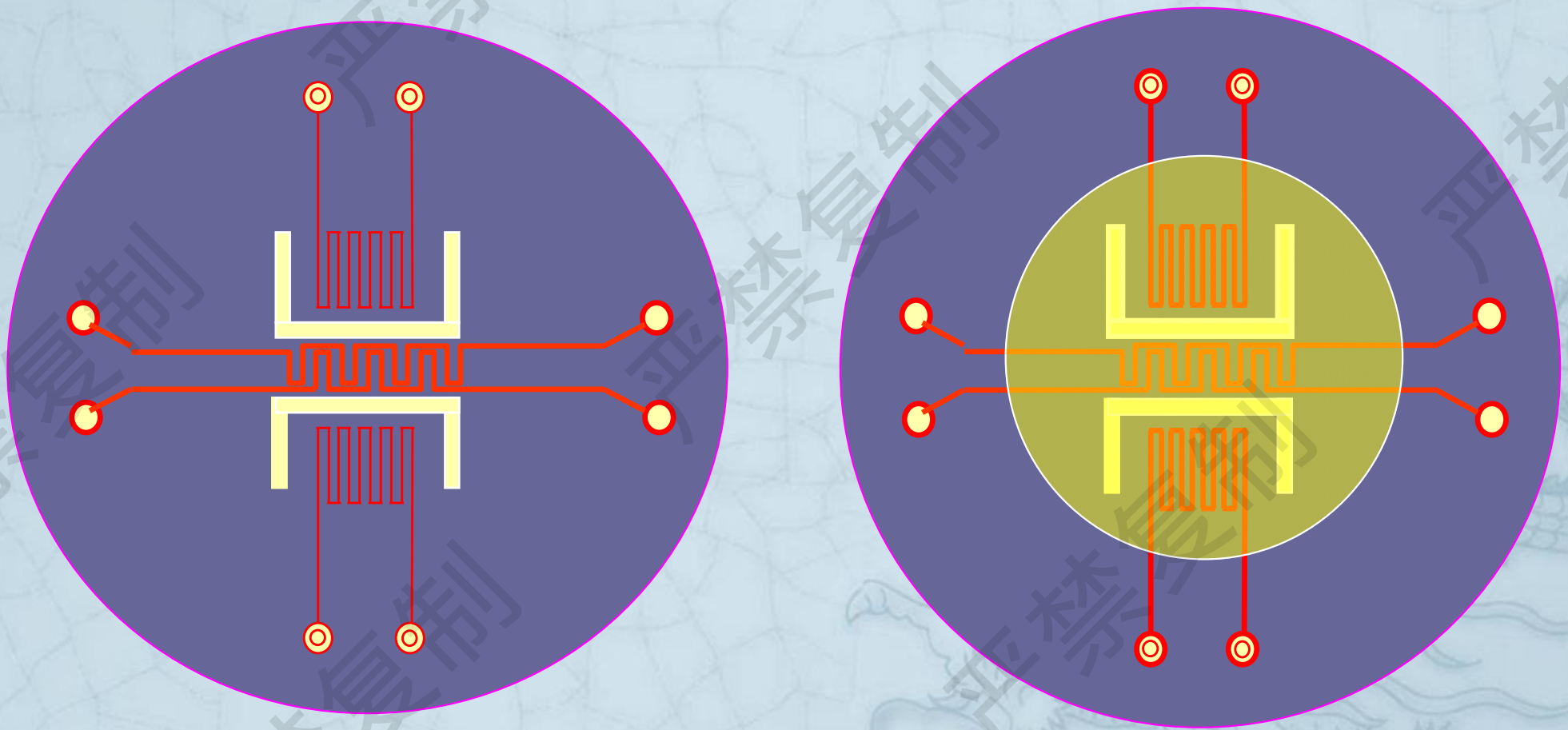
如果以加热源中心为圆心建立坐标系，通过**检测下风口温度最高点相对于加热源中心的位置，就可测得风向相对于坐标系的角。**

3 薄膜风速、风向传感器



3 薄膜风速、风向传感器

带方向识别的冗余风速敏感元件



3 薄膜风速、风向传感器

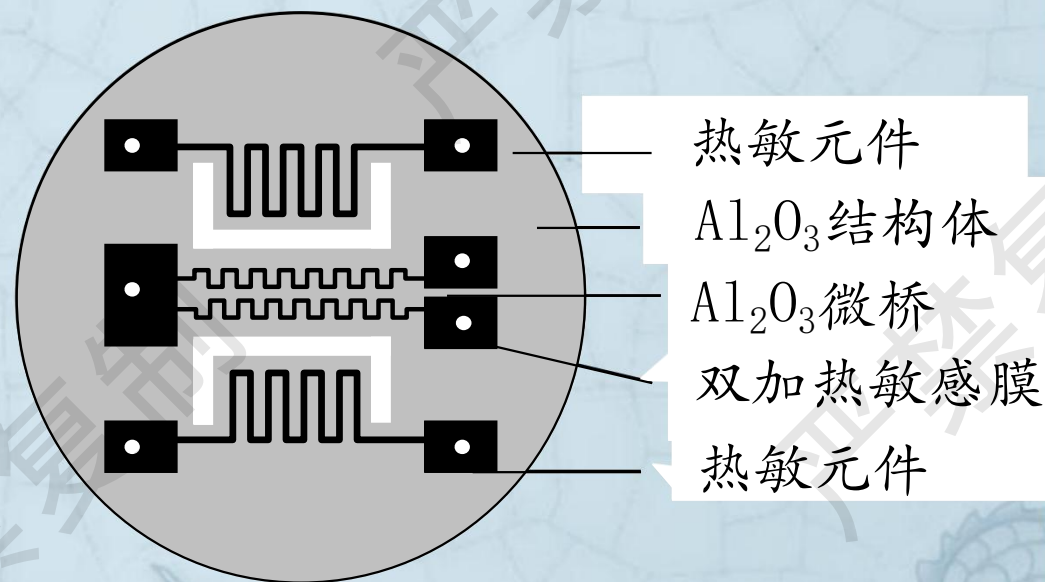
风速风向传感器

传感器结构体采用99瓷 Al_2O_3 膜片，经双面研磨抛光成厚度0.17mm膜片；在经激光切割成 $\Phi 15\text{mm}$ 圆形基片，在基片中间利用激光加工成：

5.0mm×1.0mm×0.17mm的微桥

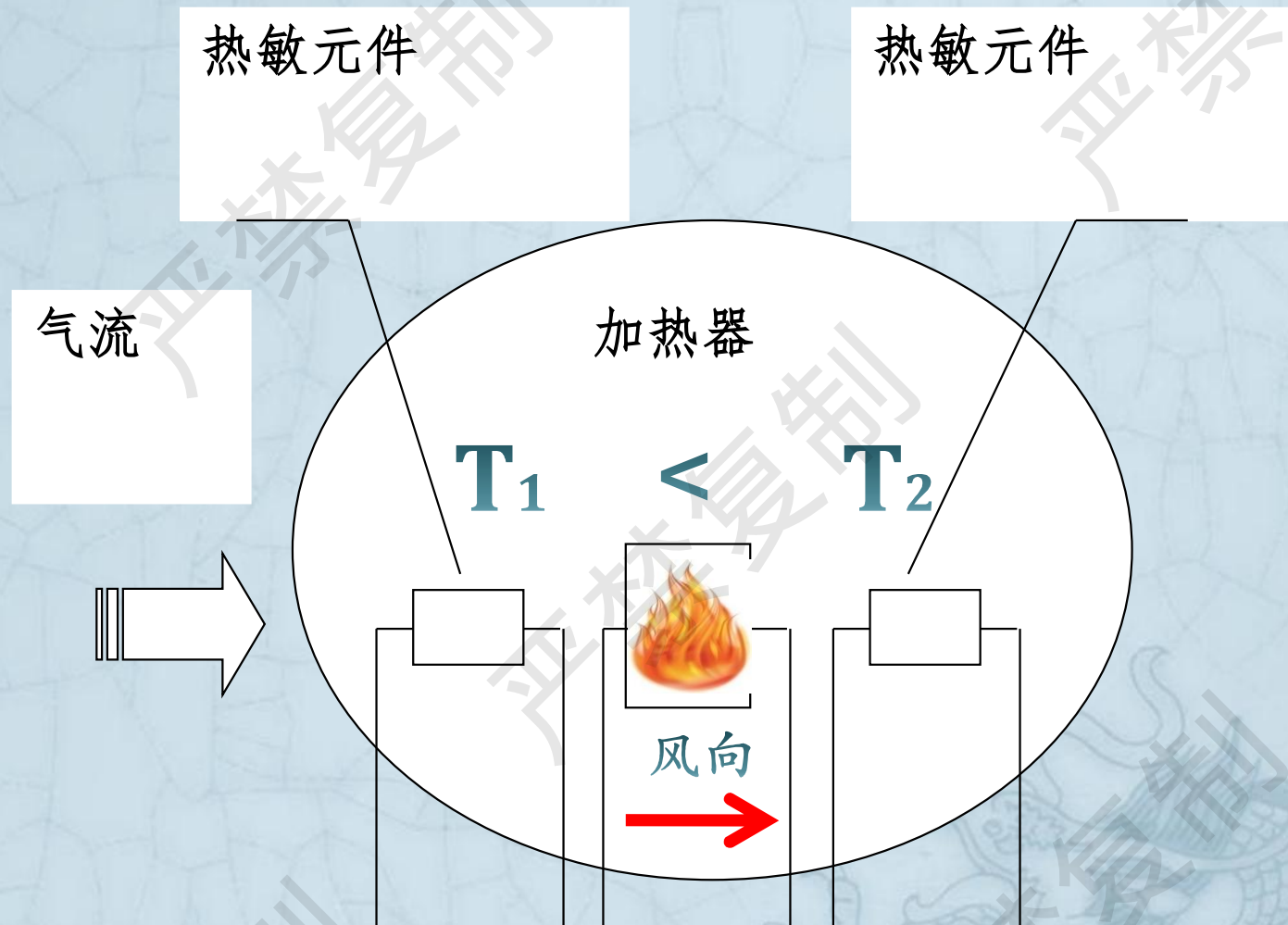
5.0mm×1.0mm×0.17mm舌型梁，

在微桥上薄膜工艺制成 20Ω 的加热敏感膜，冗余设计，在加热敏感膜相对的两个舌型梁上，加工两个标称阻值 200Ω 的热敏元件，最后在表面形成一层10nm的 SiO_2 保护层。

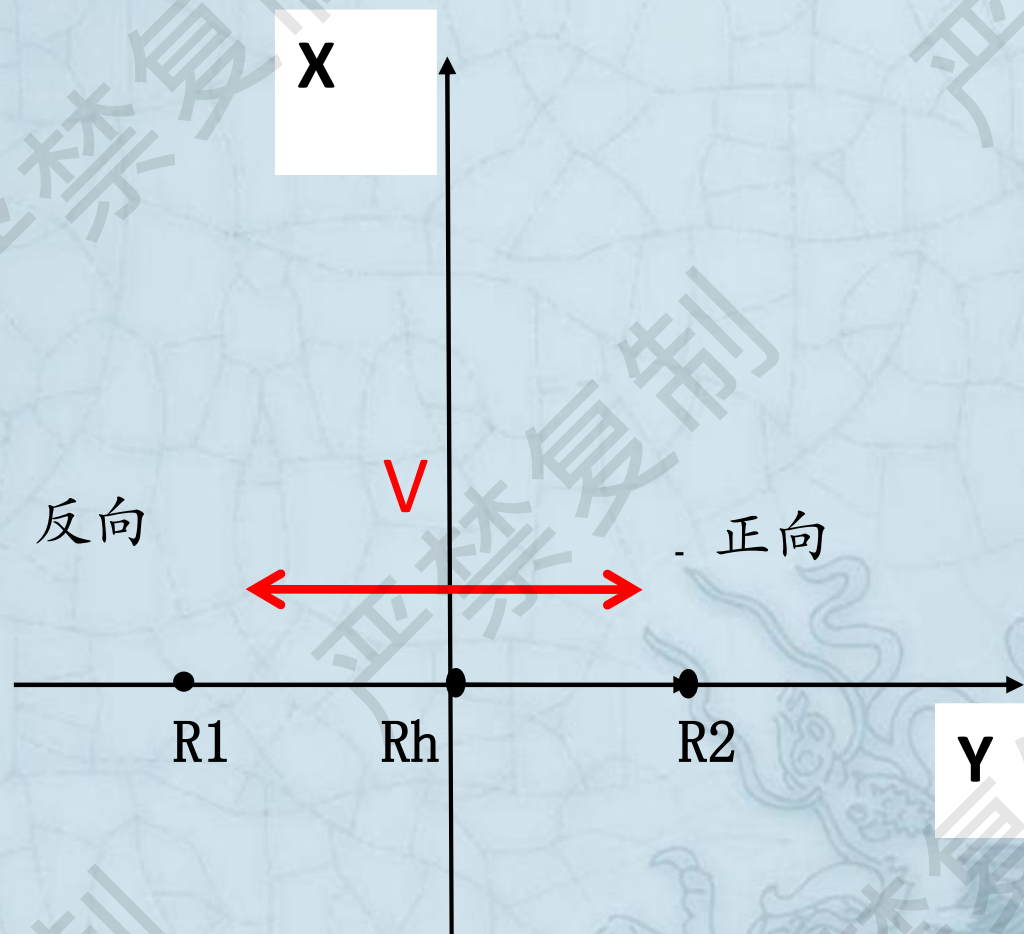


传感器芯片版图

3 薄膜风速、风向传感器

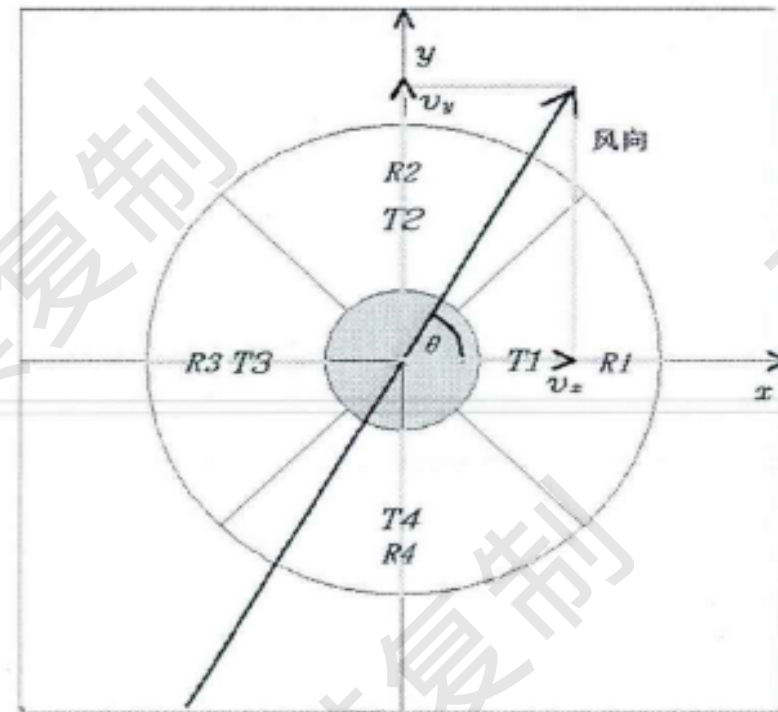
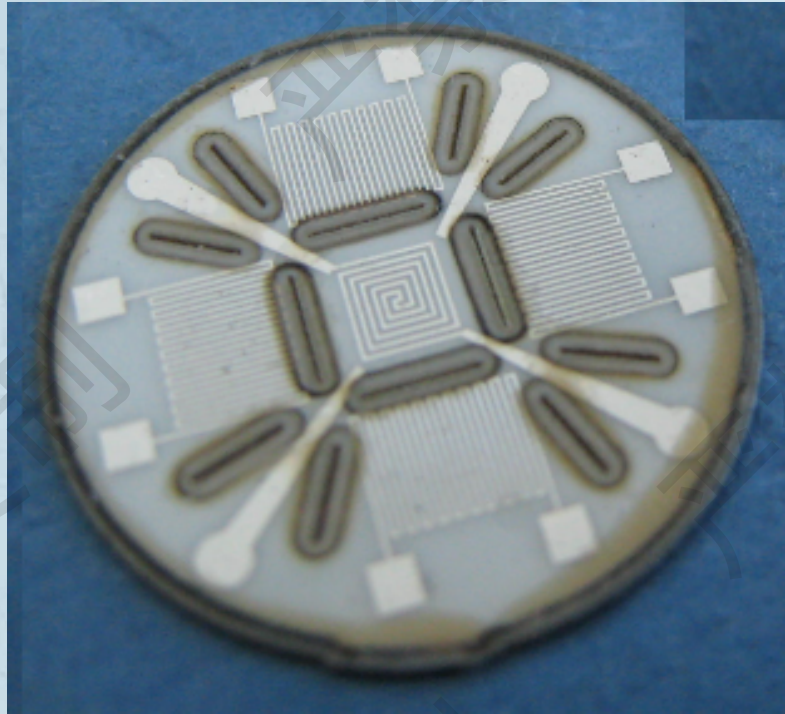


3 薄膜风速、风向传感器



3 薄膜风速、风向传感器

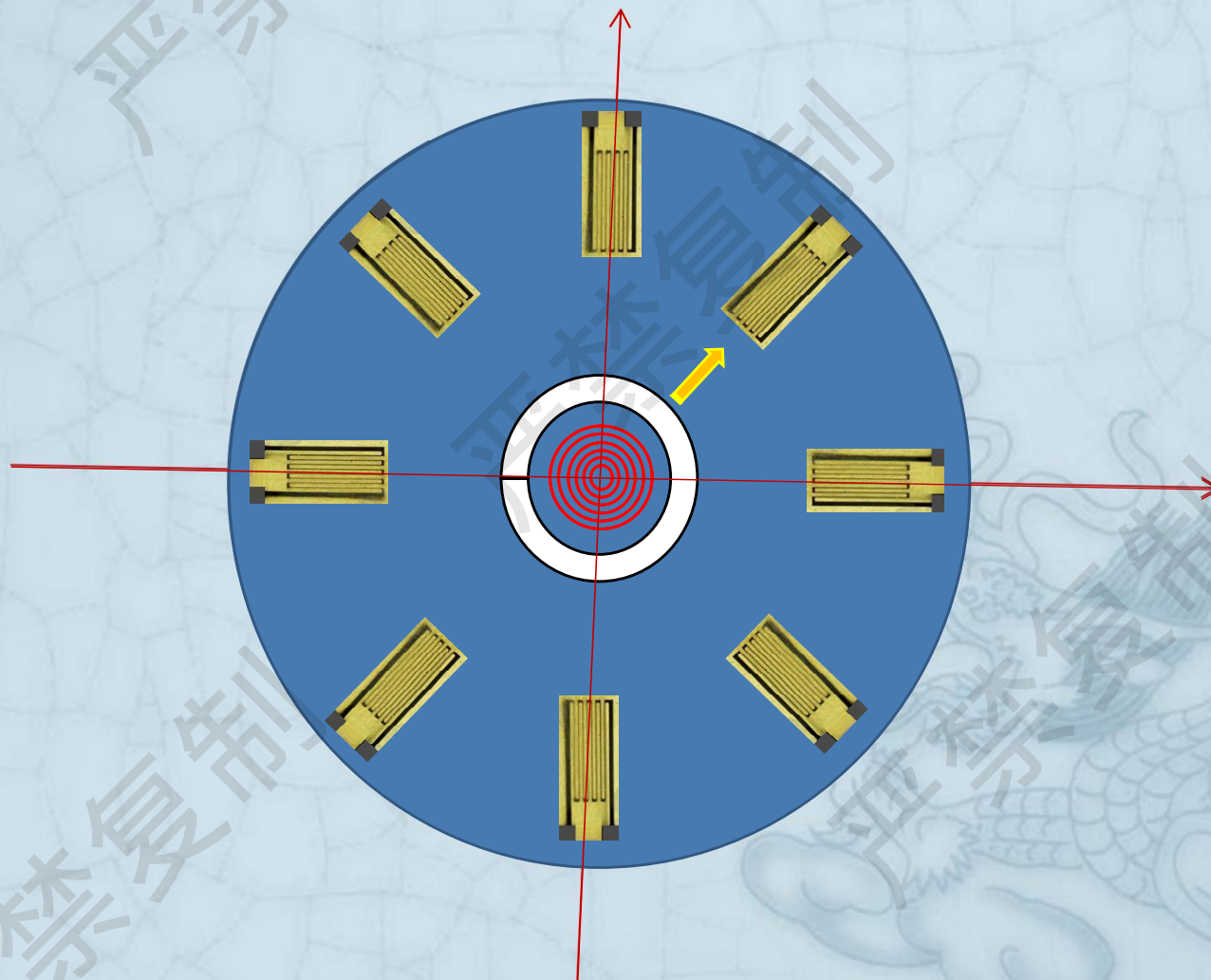
水平风速风向传感器



风向测量原理示意图

3 薄膜风速、风向传感器

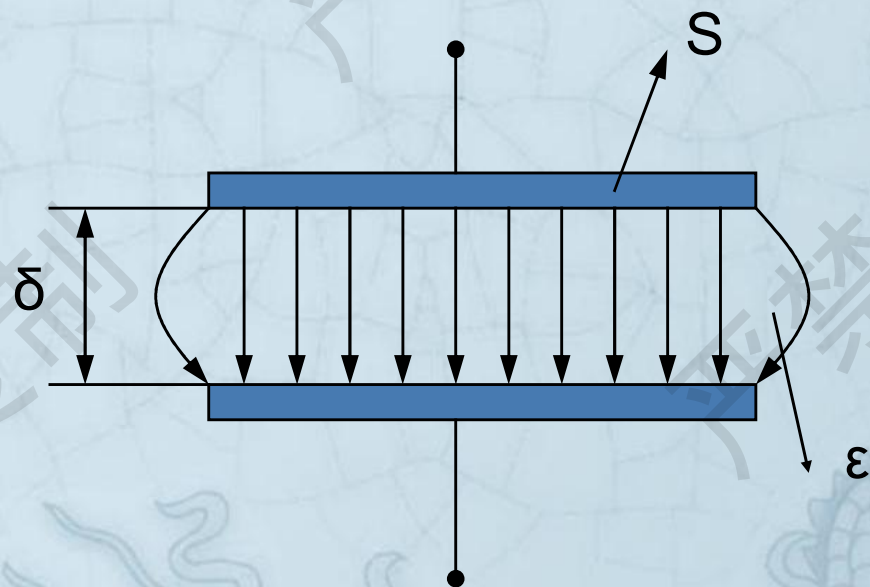
八单元风速风向传感器



4 薄膜湿度传感器

电容传感器工作原理

$$C = \frac{\varepsilon S}{d} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{d}$$



S ——极板相对覆盖面积；

d ——极板间距离；

ε_r ——相对介电常数；

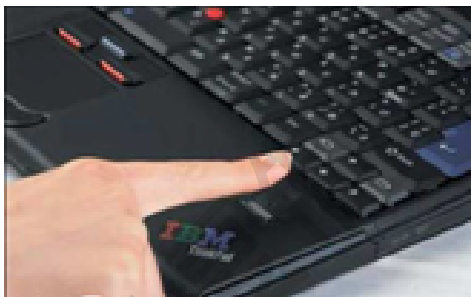
ε_0 ——真空介电常数（8.85pF/m）；

ε ——电容极板间介质的介电常数。

当被测参数变化使得 S 、 d 或 ε 发生变化时，电容量 C 也随之变化。电容式传感器可分为变间隙（极距）型、变面积型和变介电常数（介质）型三种。

4 薄膜湿度传感器（电容传感器）

电容式指纹传感器：由电容阵列构成的，内部大约包含1万只微型化的电容器。当用户将手指放在正面时，皮肤就组成了电容阵列的一个极板，电容阵列的背面是绝缘极板。由于不同区域指纹的脊和谷之间的距离也不相等，使每个单元的电容容量随之而变，由此可获得指纹图像。



(a) 笔记本指纹识别



(b) 指纹识别手机

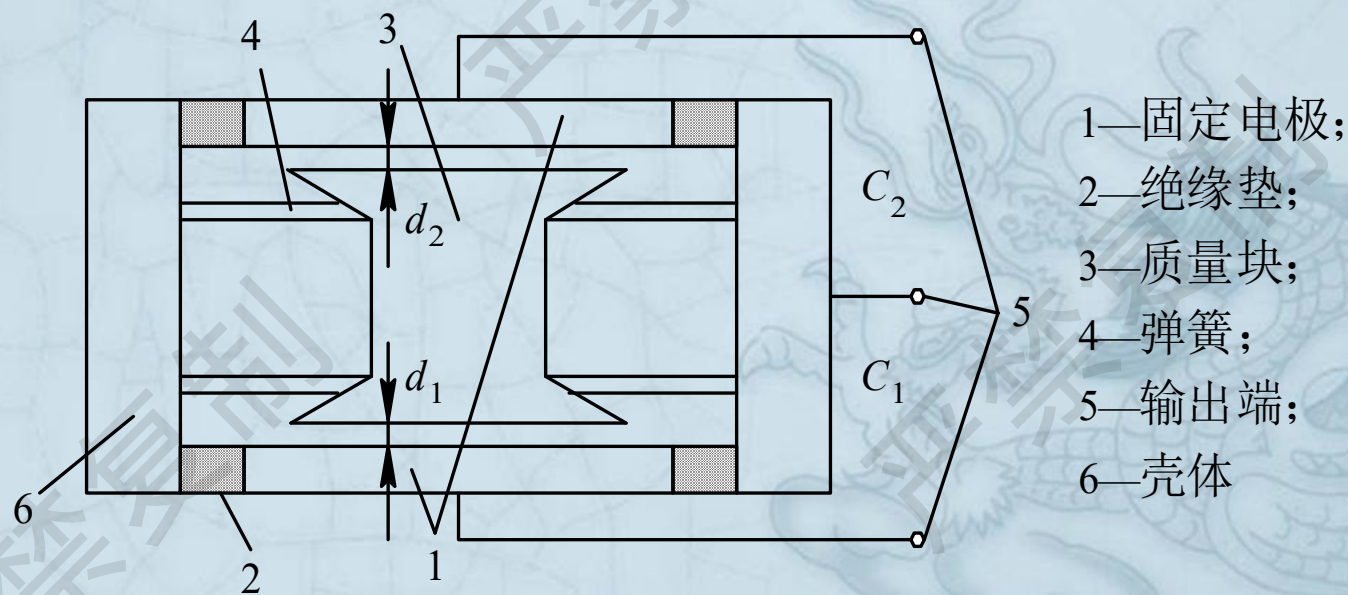


(c) 汽车防盗指纹识别

4 薄膜湿度传感器

当传感器壳体随被测对象沿垂直方向作直线加速运动时，质量块在惯性空间中相对静止，两个固定电极将相对于质量块在垂直方向产生大小正比于被测加速度的位移。此位移使两电容的间隙发生变化，一个增加，一个减小，从而使 C_1 、 C_2 产生大小相等、符号相反的增量，此增量正比于被测加速度。

电容式加速度传感器的主要特点是频率响应快和量程范围大，大多采用空气或其它气体作阻尼物质。



差动式电容加速度传感器结构图

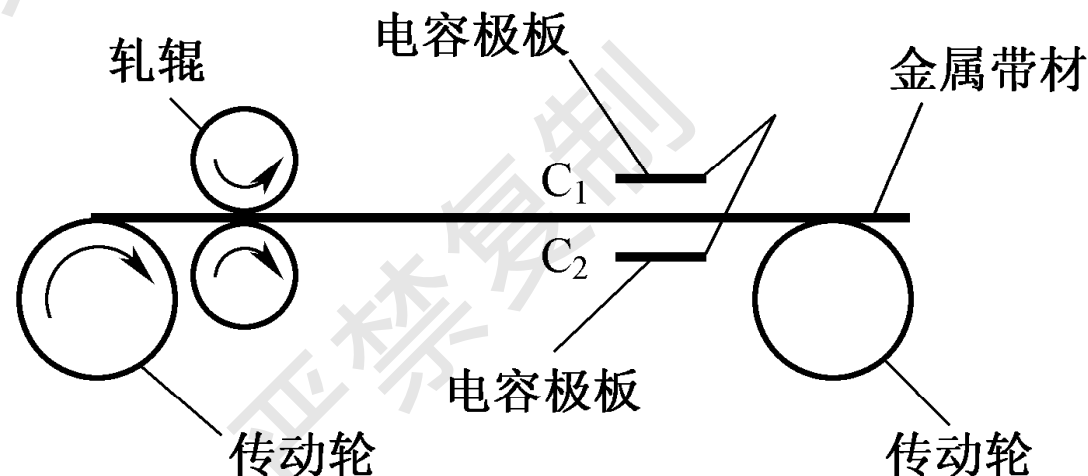
4 薄膜湿度传感器

电容测厚仪

电容测厚传感器是用来对**金属带材**在轧制过程中厚度的检测，其工作原理是在被测带材的上下两侧各置放一块面积相等，与带材距离相等的极板，这样极板与带材就构成了两个电容器 C_1 、 C_2 。把两块极板用导线连接起来成为一个极，而带材就是电容的另一个极，其总电容为 $C_1 + C_2$ ，如果带材的厚度发生变化，将引起电容量的变化，用交流电桥将电容的变化测出来，经过放大即可由电表指示测量结果。



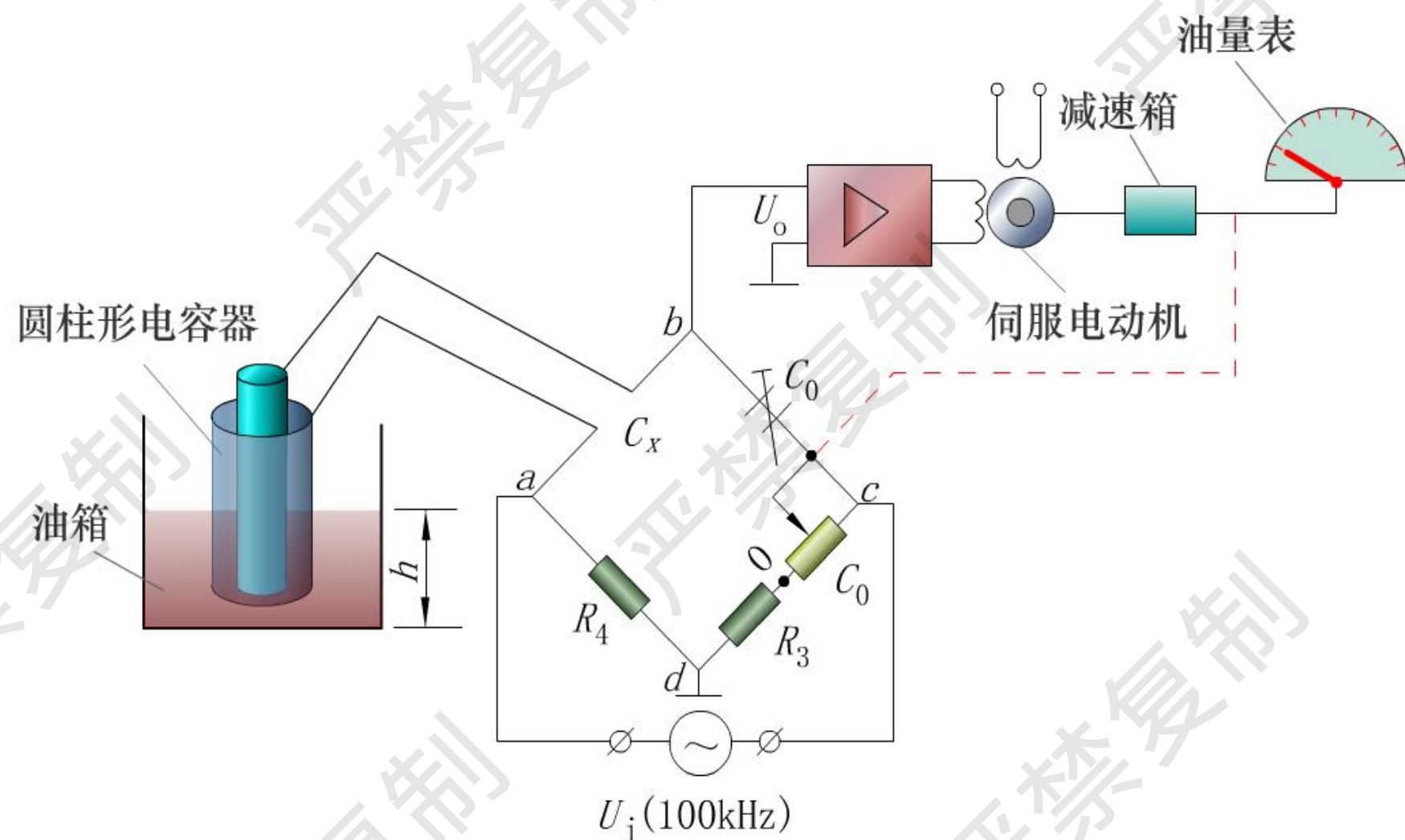
(a) 实物图



(b) 装置示意图

4 薄膜湿度传感器

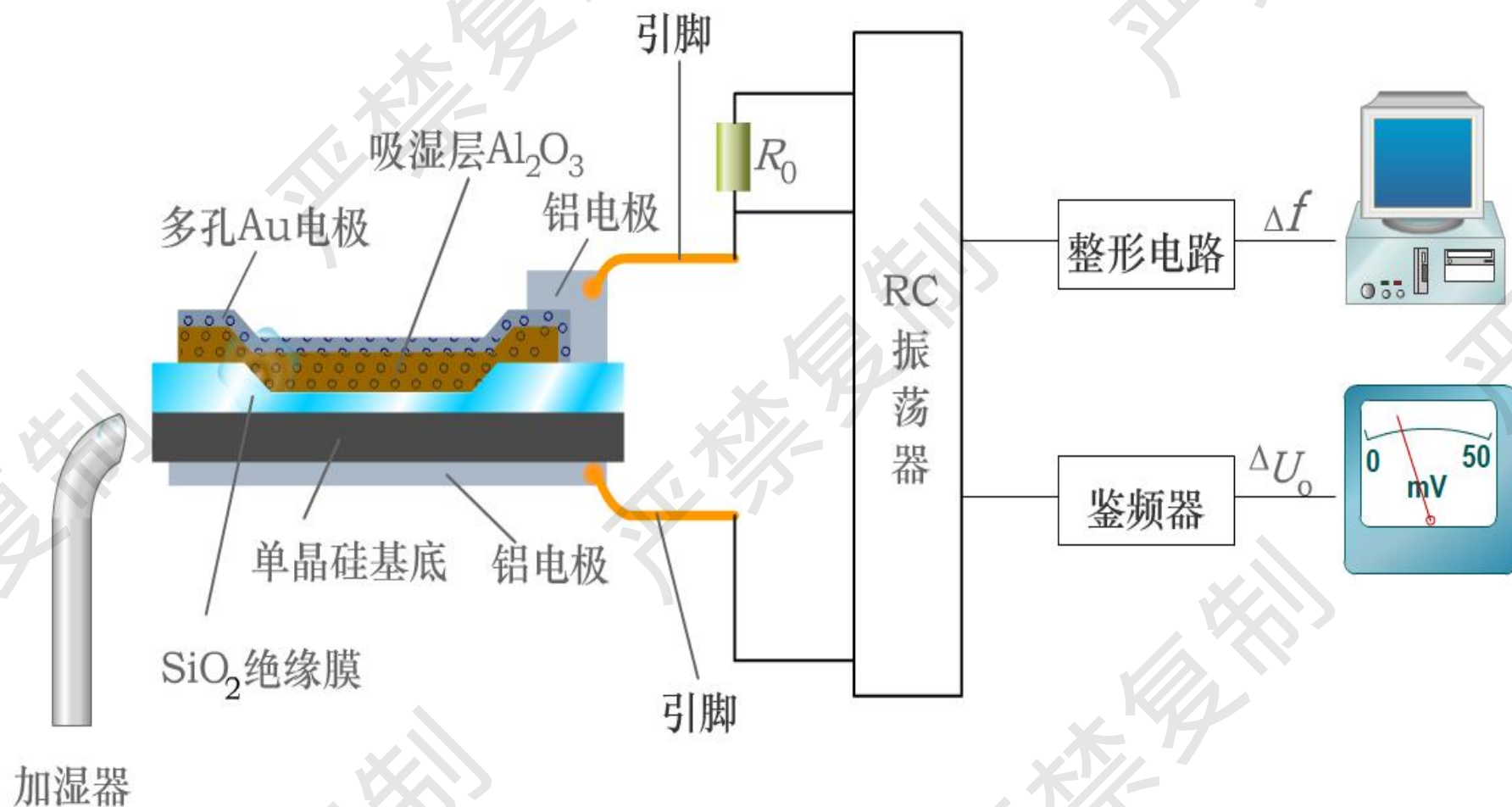
电容式油量表



电容式油量表原理

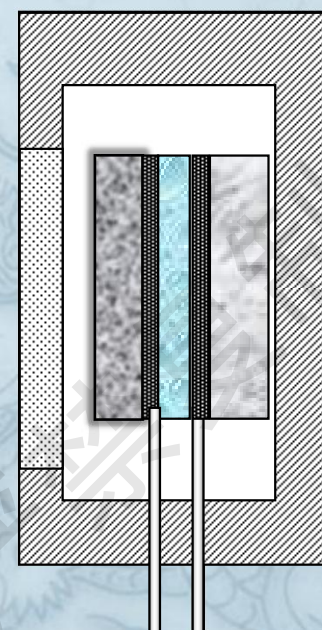
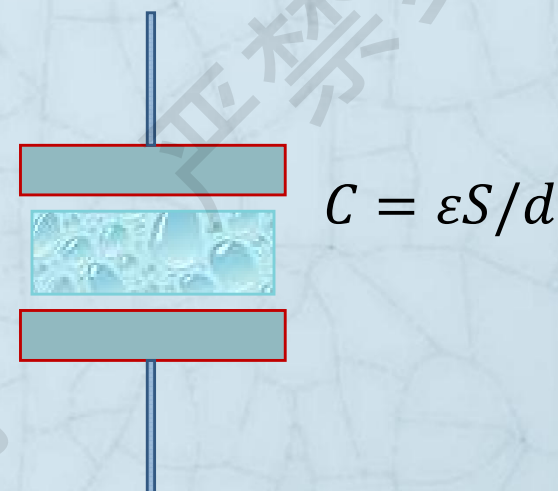
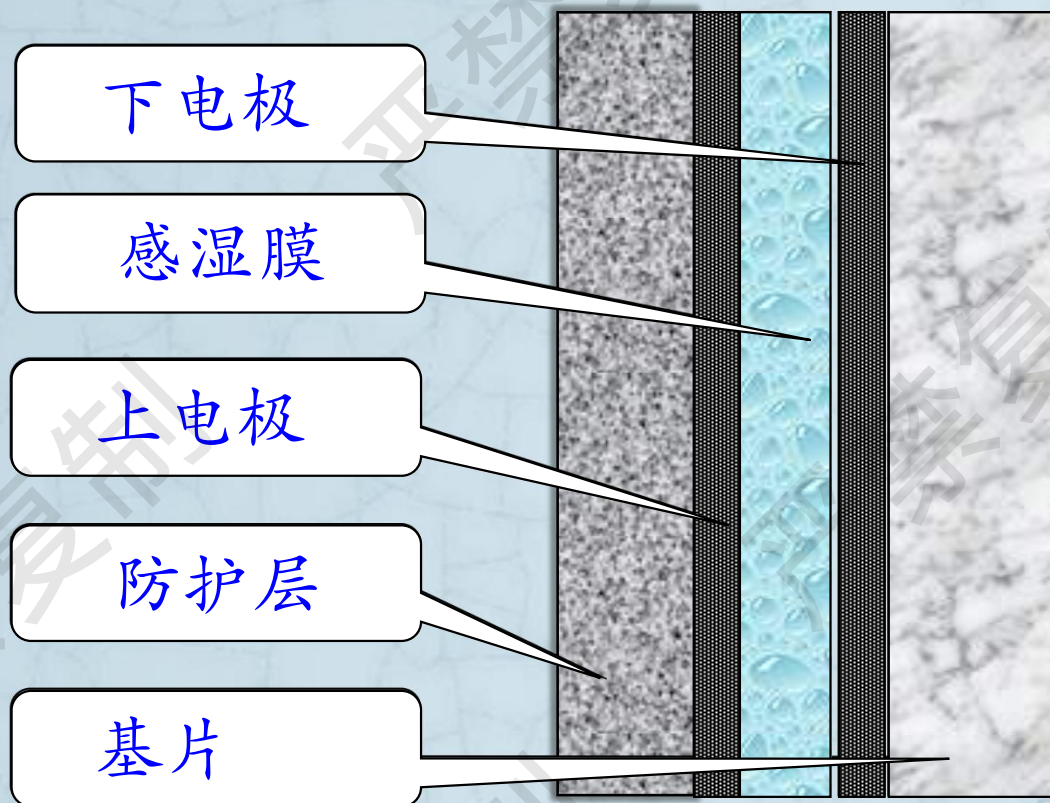
4 薄膜湿度传感器

电容湿度传感器



4 薄膜湿度传感器

电容湿度传感器构成



深圳市曙建科技有限公司

4 薄膜湿度传感器

电容感湿原理

$$\log \varepsilon = x_1 \log \varepsilon_1 + x_2 \log \varepsilon_2$$

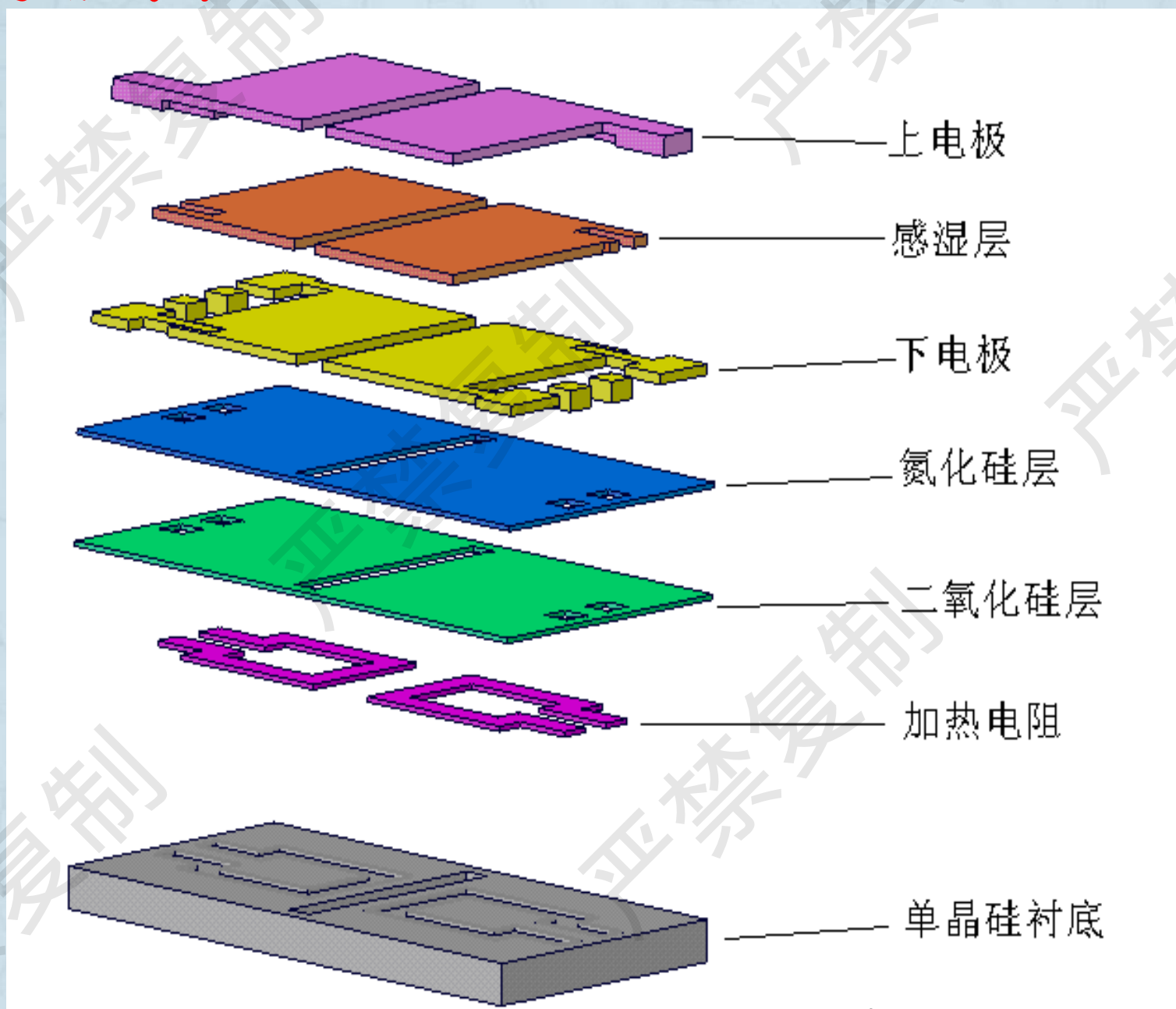
$$C = \varepsilon S/d = f(X_2)$$

其中 ε_1 为聚合物介电常数， ε_2 为水分子的介电常数， x_1 和 x_2 分别是聚合物与水的体积百分率， ε 为总的介电常数。

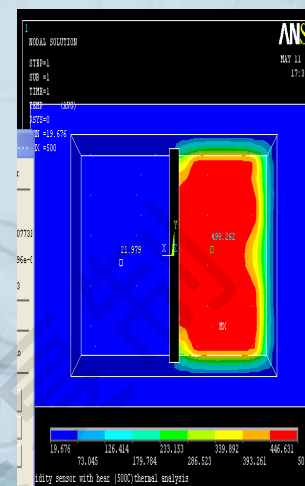
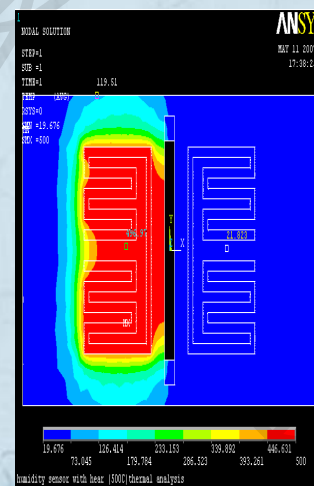
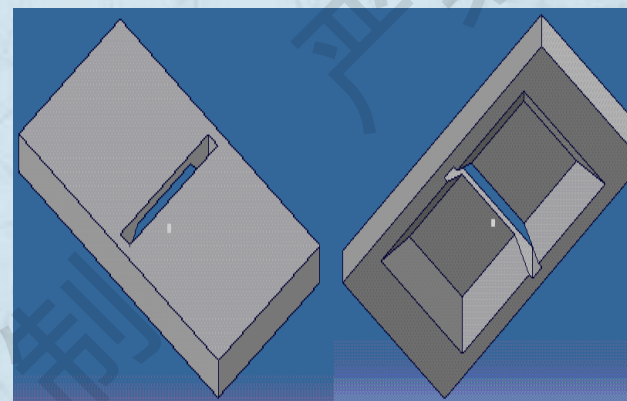
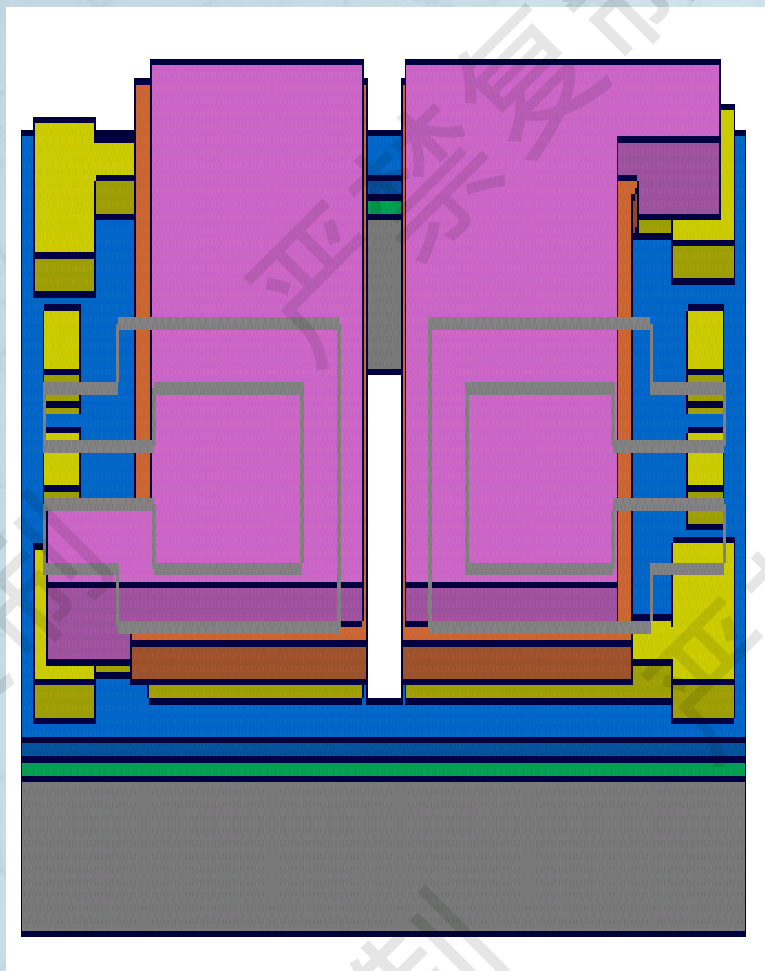
4 薄膜湿度传感器

电容湿度传感器设计

薄膜湿度传感器芯片



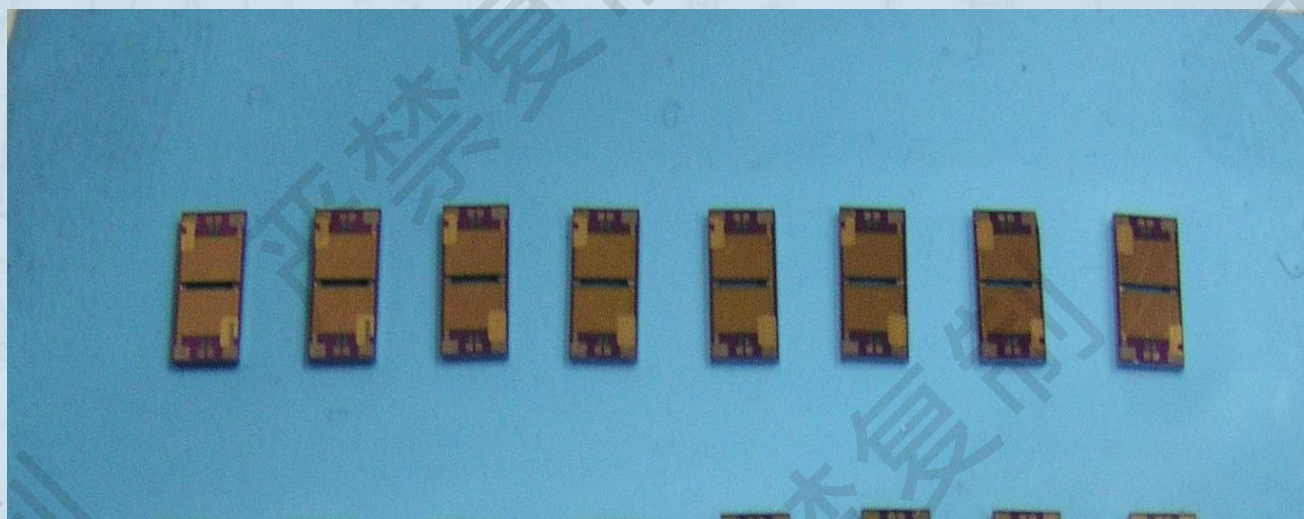
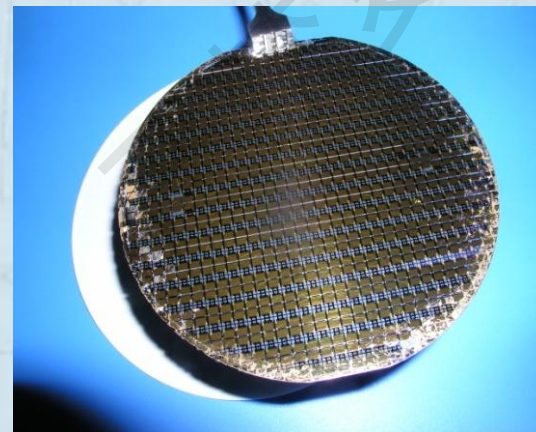
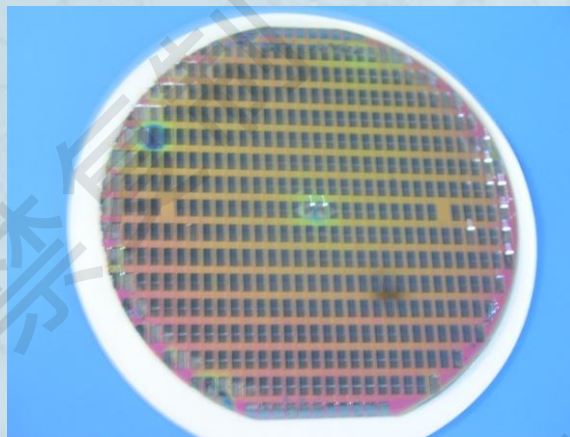
4 薄膜湿度传感器



具有热净化功能的双模块集成湿度传感器芯片结构示意图

4 薄膜湿度传感器

以单晶硅为基底，按照薄膜工艺进行加工，具有加热单元和敏感单元结构的薄膜湿度传感器

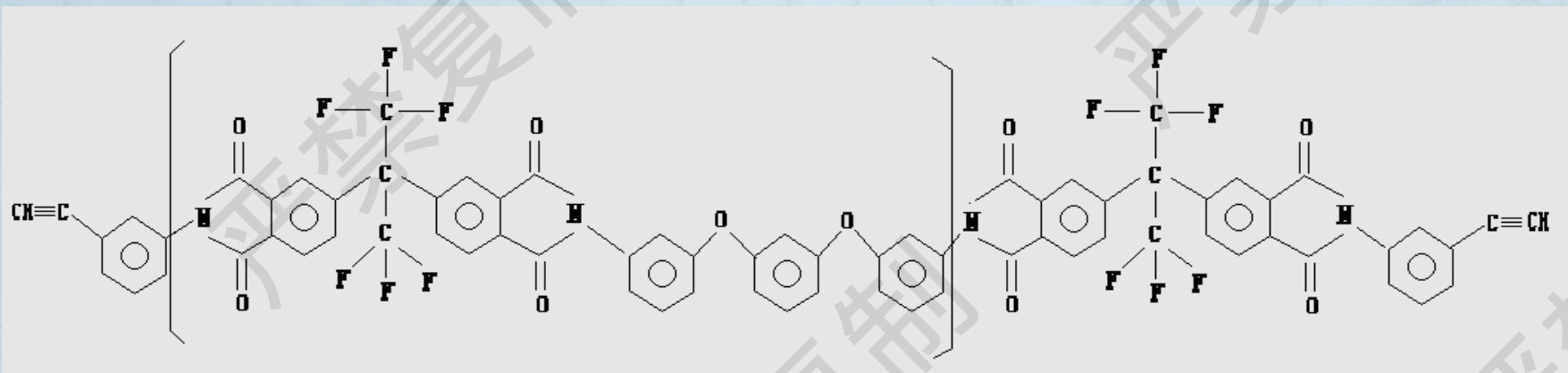


具有加热功能的双模块集成湿度传感器芯片照片

4 薄膜湿度传感器

高分子电介质材料

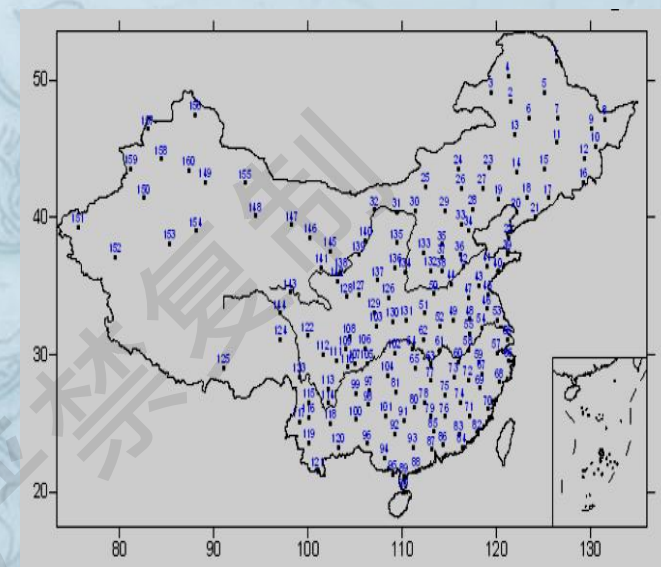
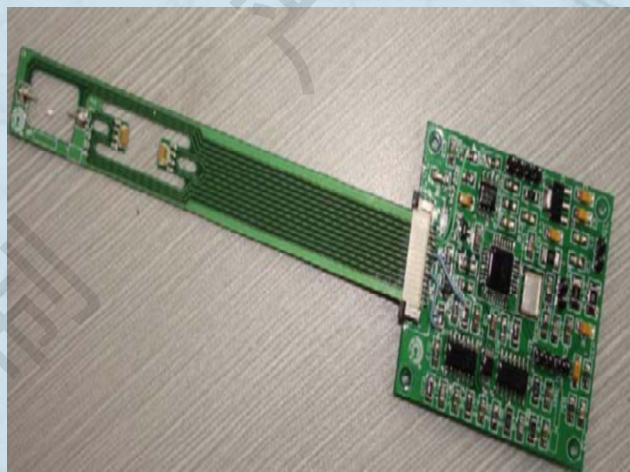
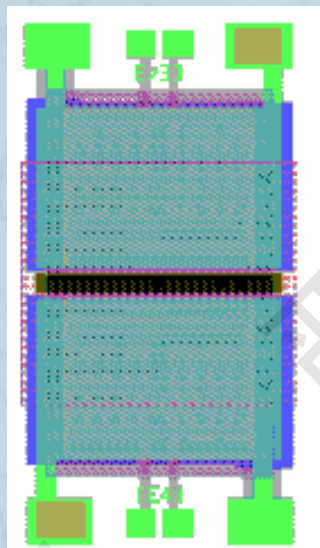
氟化聚酰亚胺分子式



PI：结构为交联三维网络结构，耐高温耐高湿、耐化学性强。引入含氟基团PI特点：有效地改变其理化、电学性质。

效果： 湿滞 $\leq 1\%RH$ 、灵敏度 $\geq 0.2pF/\%RH$
温度系 $\pm 0.2\%RH/^{\circ}C$ 范围内；
高温稳定性 $\pm 2\%RH/24h$ 。

4 薄膜湿度传感器



4 薄膜湿度传感器



氟化铯	4%RH
氯化锂	11%RH
氯化镁	33%RH
溴化钠	59%RH
氯化钠	75%RH
氯化钾	85%RH
硫酸钾	98%RH
纯 水	100%RH

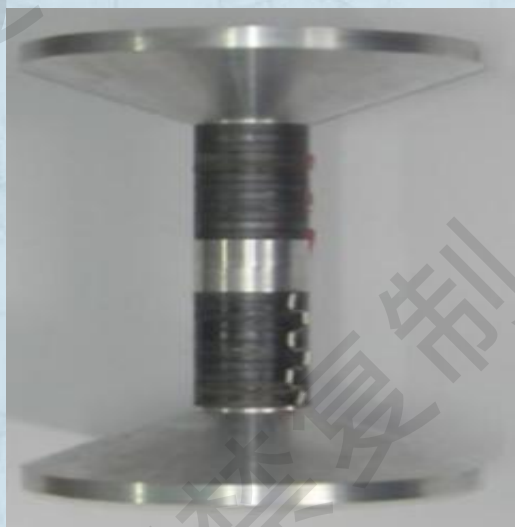
5 薄膜水听器

水听器也称水声侦听传感器，水下听声器、水听器，它是一种水下侦听设备，可以检测和记录来自各个方向的海洋声音。人们常常认为海底世界是寂静的。事实上，许多海洋生物利用声音进行交流、繁殖和寻找猎物；各种舰船；海洋环境研究（微地震和地下火山活动）；导航/定位系统；深海作业等等都有声音的产生。

水听器分类：压电式水听器、光纤水听器、MEMS硅基水听器

5 薄膜水听器

压电式水听器



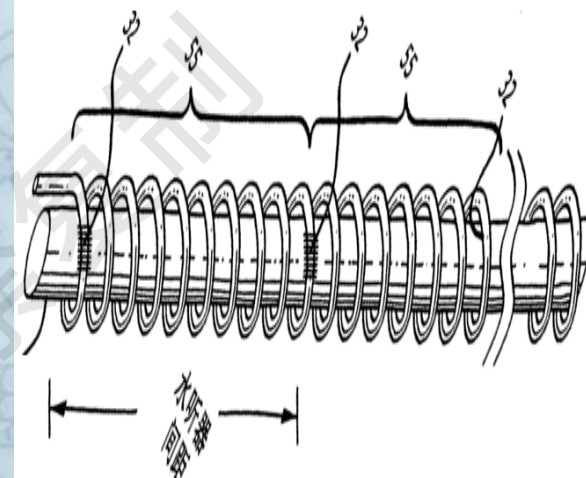
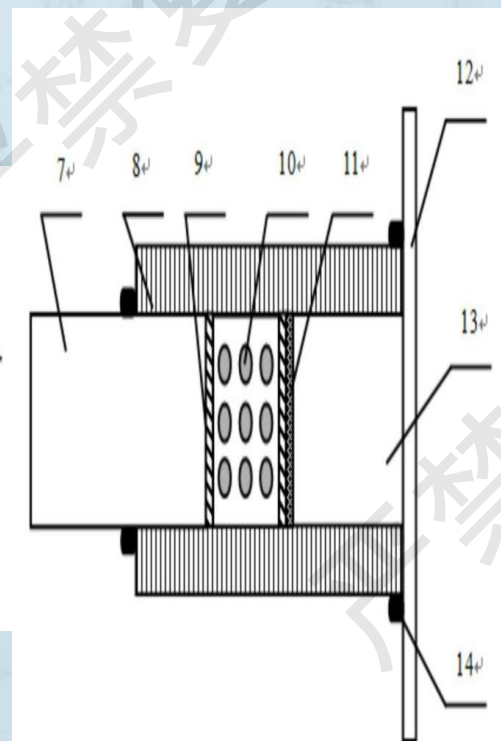
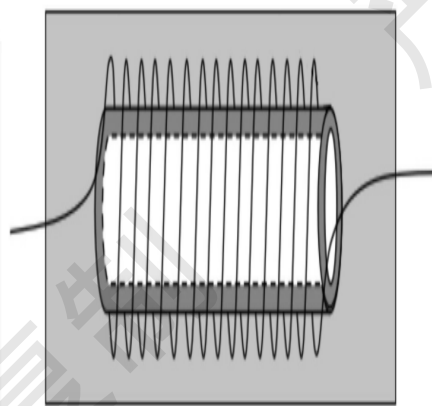
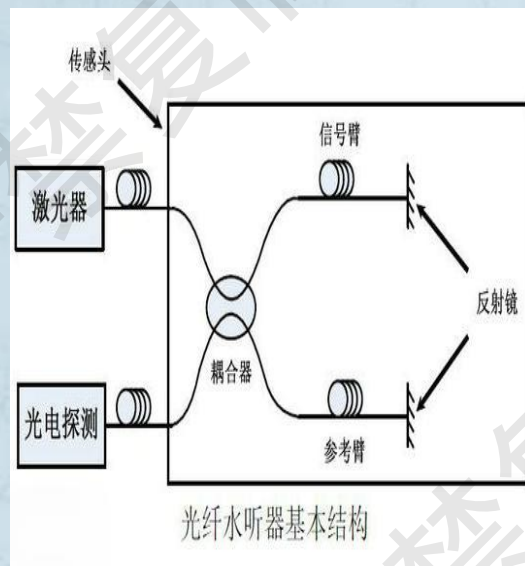
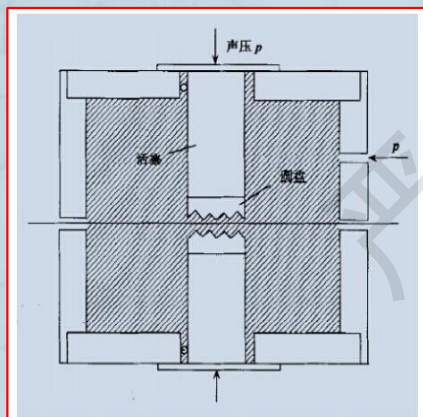
压电式水听器:

- 1: 组阵复杂、体积大, 投放隐蔽性不好;
- 2: 成本高, 密集投放收到限制。



5 薄膜水听器

光纤式水听器 强度调制型、干涉型和光栅型

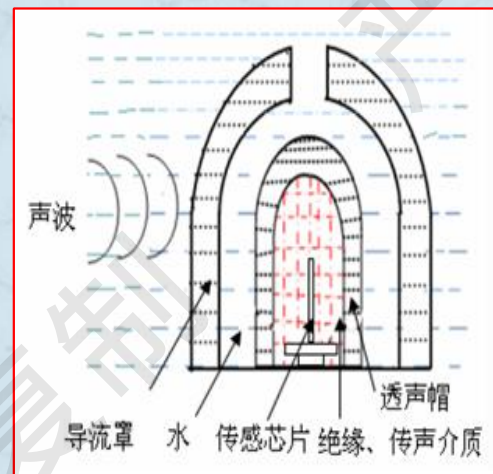
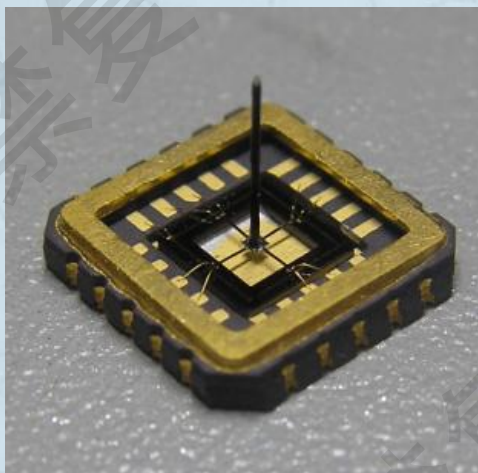
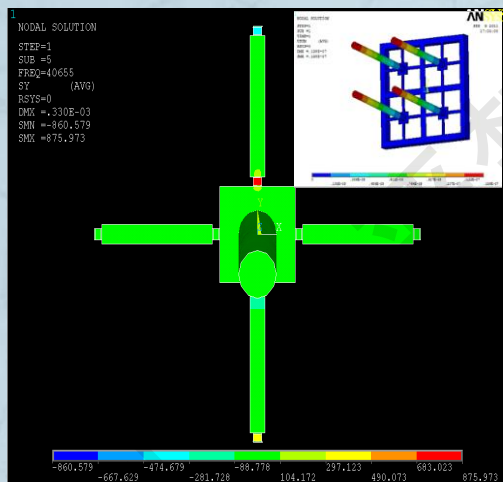


光纤式声传感器：

- 1：信号调制仪器复杂，组阵复杂；
- 2：灵敏度低、方向性不好、低频性能差；
- 3：成本高，密集投放收到限制。

5 薄膜水听器

MEMS硅基水听器（美军已批量应用）



依据仿生学理论，模拟鱼类**侧线器官**探测水中声波振动原理，设计的微纤毛式矢量水听器。

仿生纤毛式MEMS水声传感器：

- 1：动态性能低；
- 2：纤毛制作一致性还没有解决；
- 3：硅基水听器--湿气大、盐雾重、腐蚀力强。

5 薄膜水听器

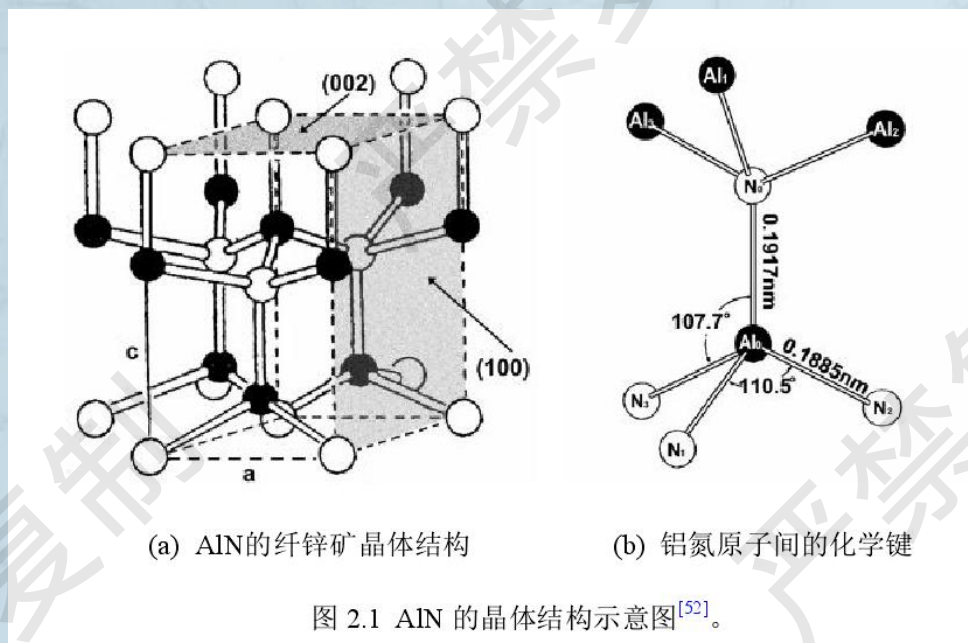
半导体材料的发展：

- 1.第一代半导体：以Si，Ge半导体材料为代表；
- 2.第二代半导体：以GaAs，InP半导体材料为代表；
- 3.第三代半导体：以碳化硅（SiC），氮化镓（GaN），氧化锌（ZnO），金刚石和氮化铝（AlN）为代表的宽禁带半导体材料，具有禁带宽度宽，击穿电场高，热导率高，电子饱和速率高以及抗辐射能力高等优点。

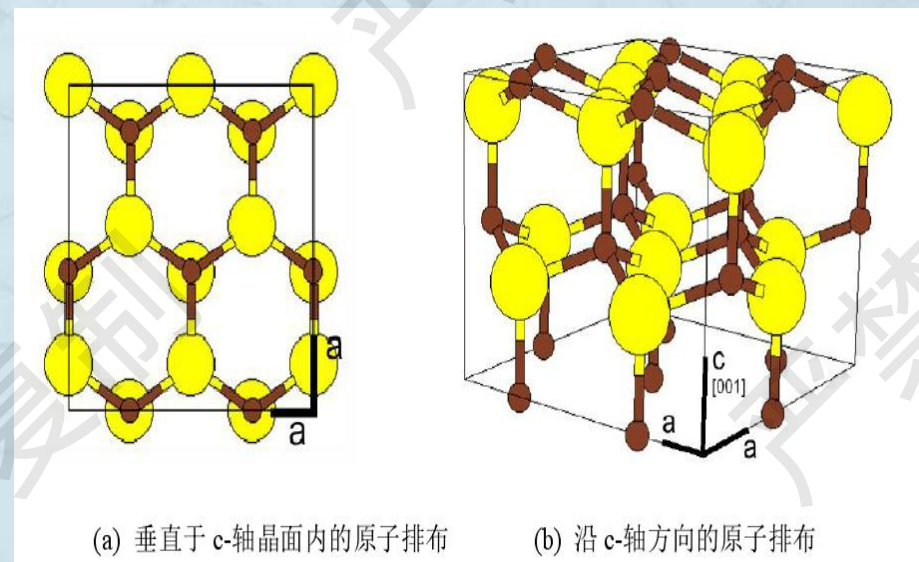
从第三代半导体材料和器件研究发展现状来看，较为成熟的是SiC和GaN半导体材料，其中SiC技术最为成熟，而ZnO、金刚石和AlN等宽禁带半导体材料的研究尚属起步阶段。

5 薄膜水听器

AlN 薄膜水声传感器

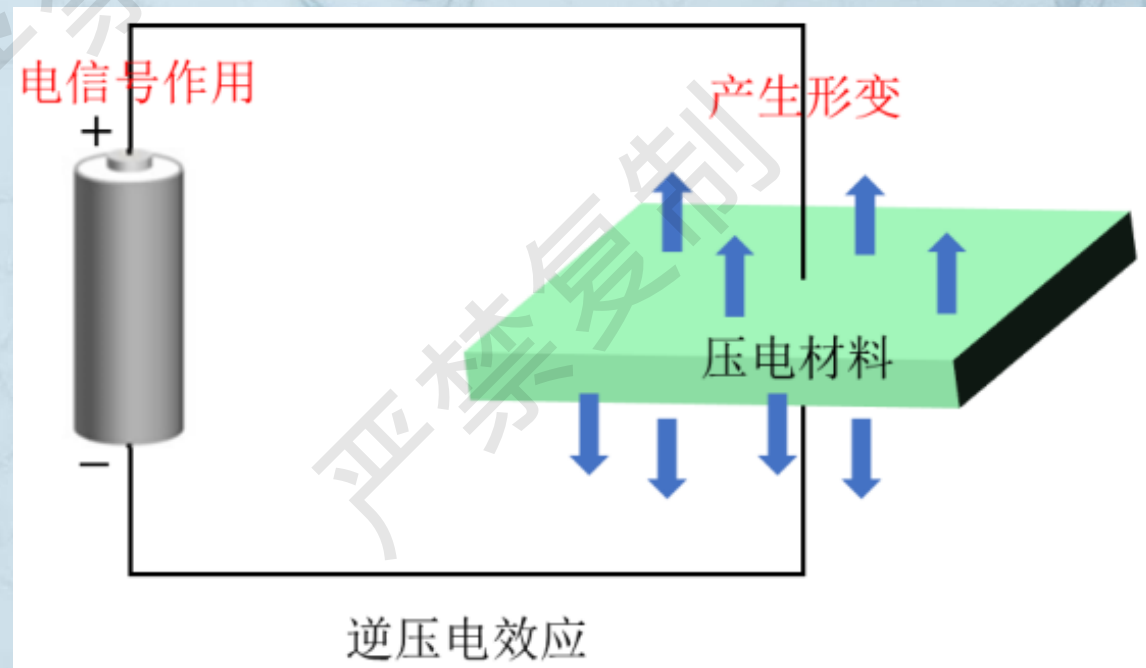
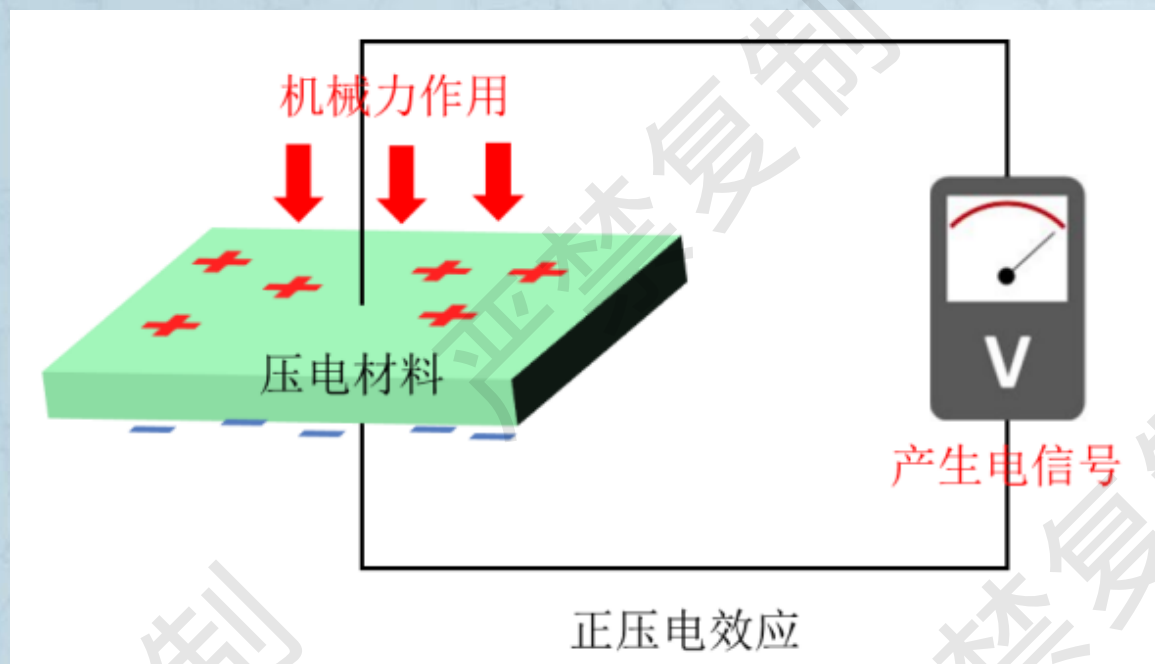


氮化铝(Aluminium nitride, AlN)是铝的氮化物, 其晶体结构为**六角纤锌矿**结构, 由一个Al(N)原子与相邻的四个N(Al)原子构成一个四面体。

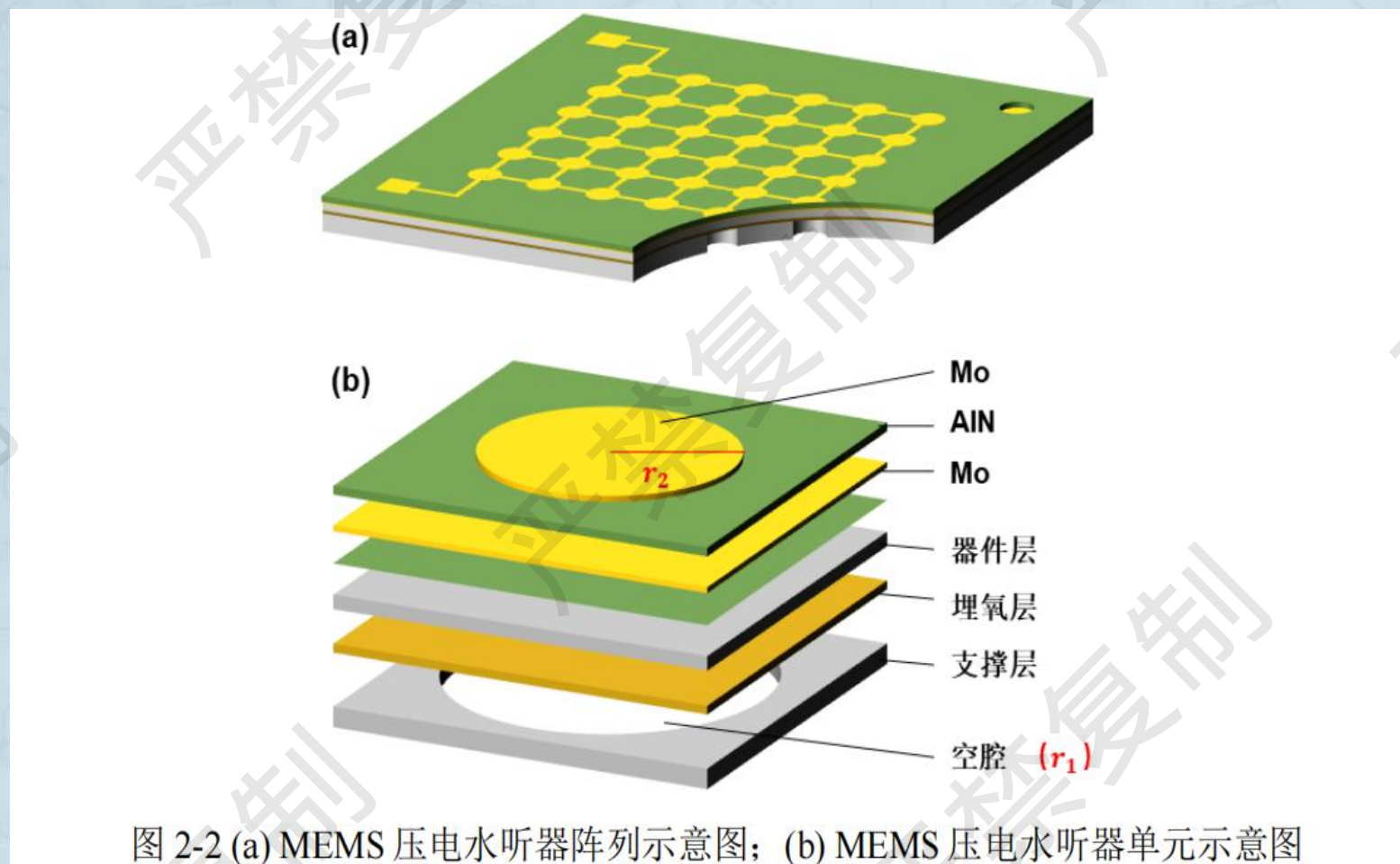


AlN材料的自发极化方向沿**c-轴**方向, 并且AlN晶体沿**c-轴**方向上原子间距较大, 所以, 当沿**c-轴**方向施加形变或电场时, AlN薄膜的电偶极矩变化最明显, **正压电或逆压电效应更明显**。

5 薄膜水听器



5 薄膜水听器

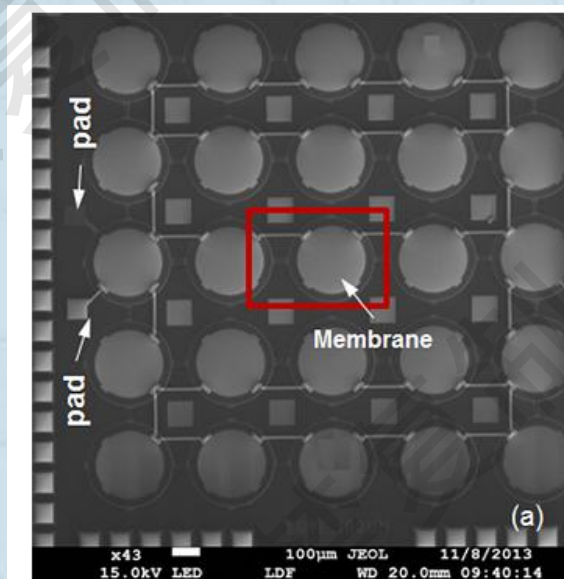
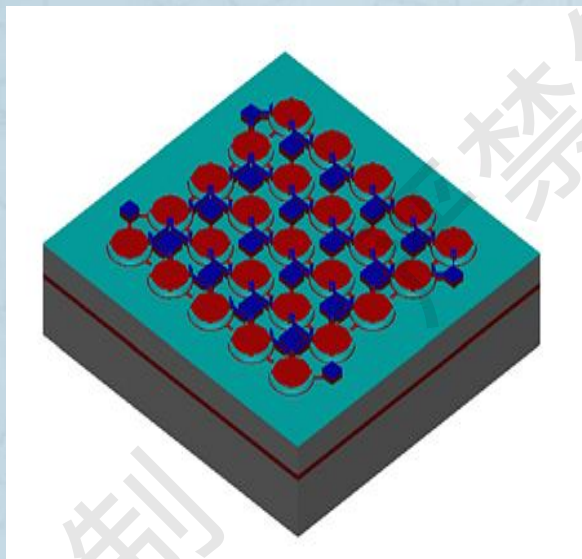


5 薄膜水听器

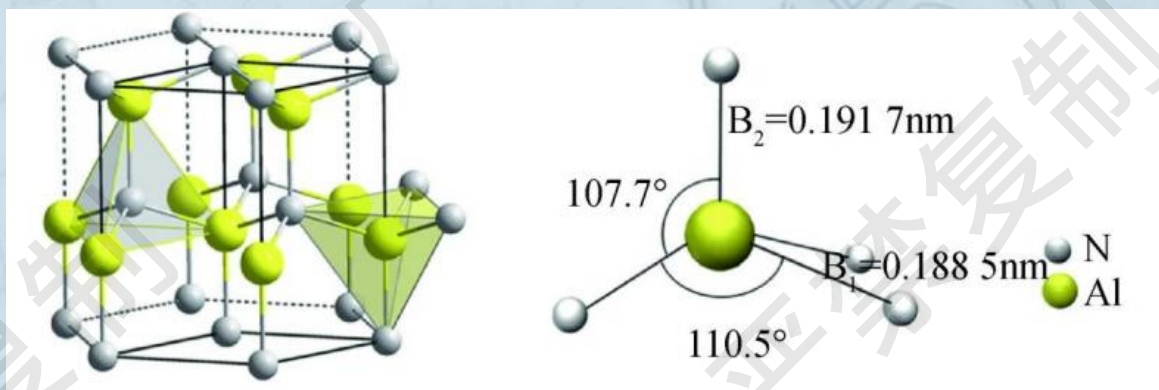
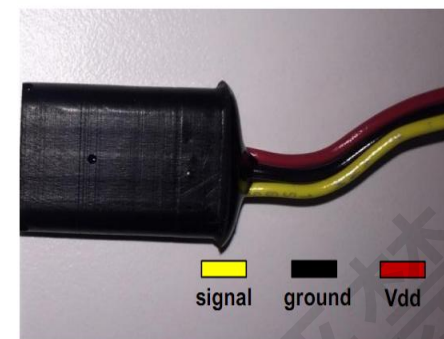


圆形电极式以及环形电极式水听器示意图

5 薄膜水听器

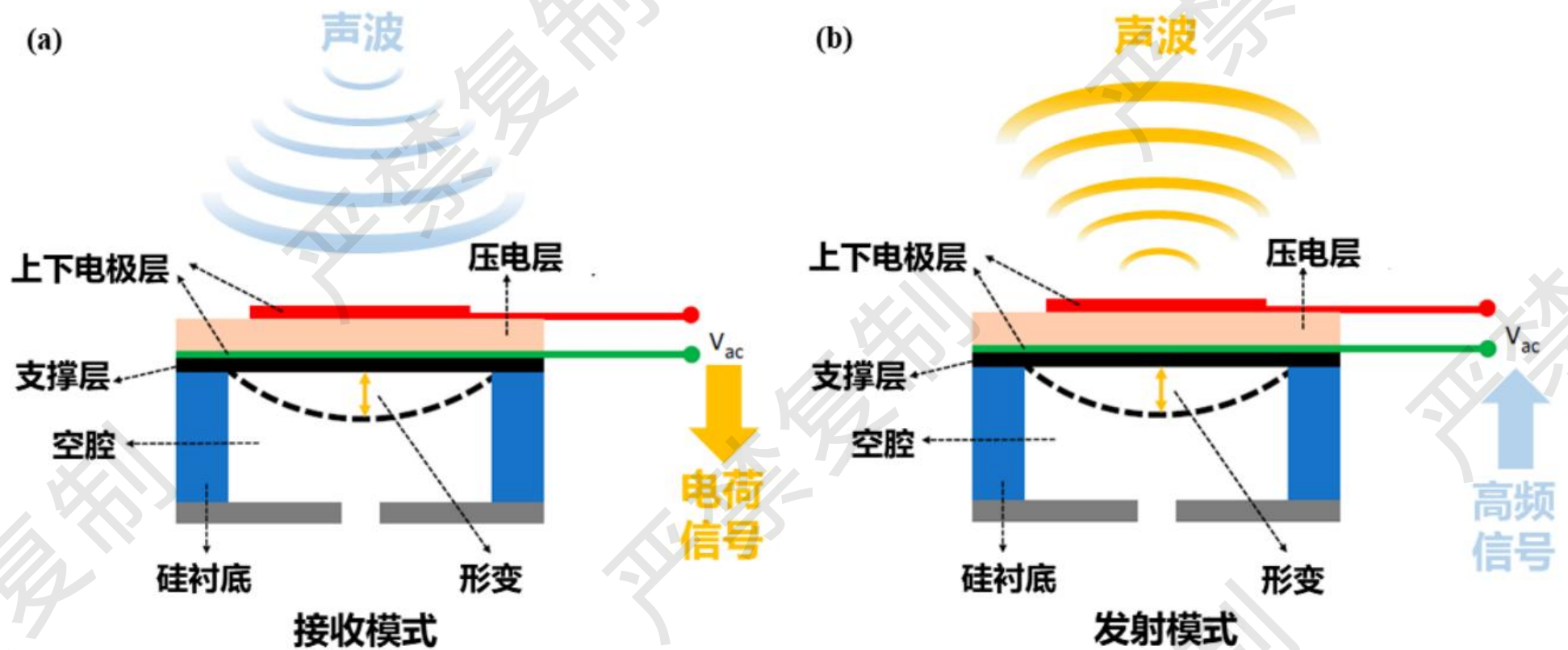


Package size: 28mmx15mmx6mm

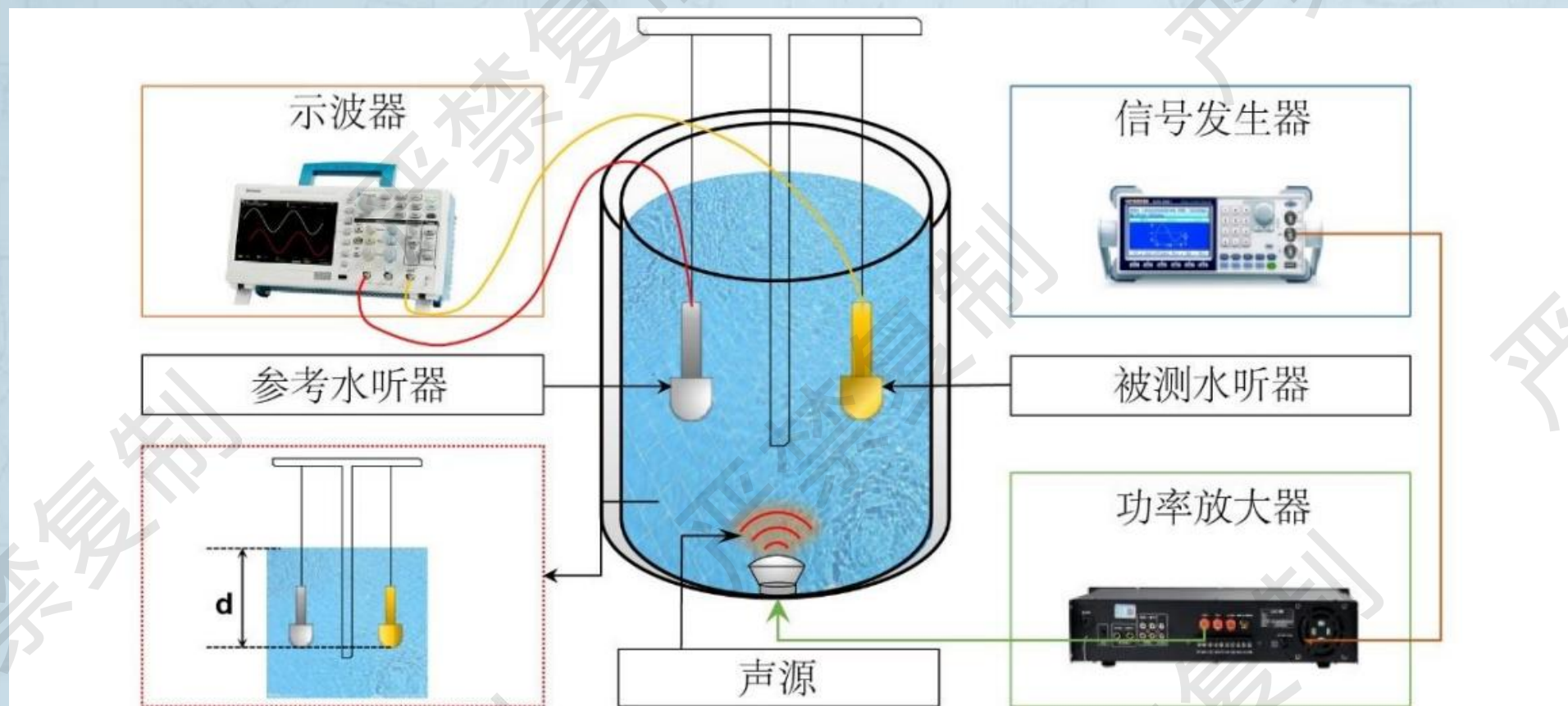


水听器设计采用的是5*5阵列的AlN压电薄膜设计

5 薄膜水听器

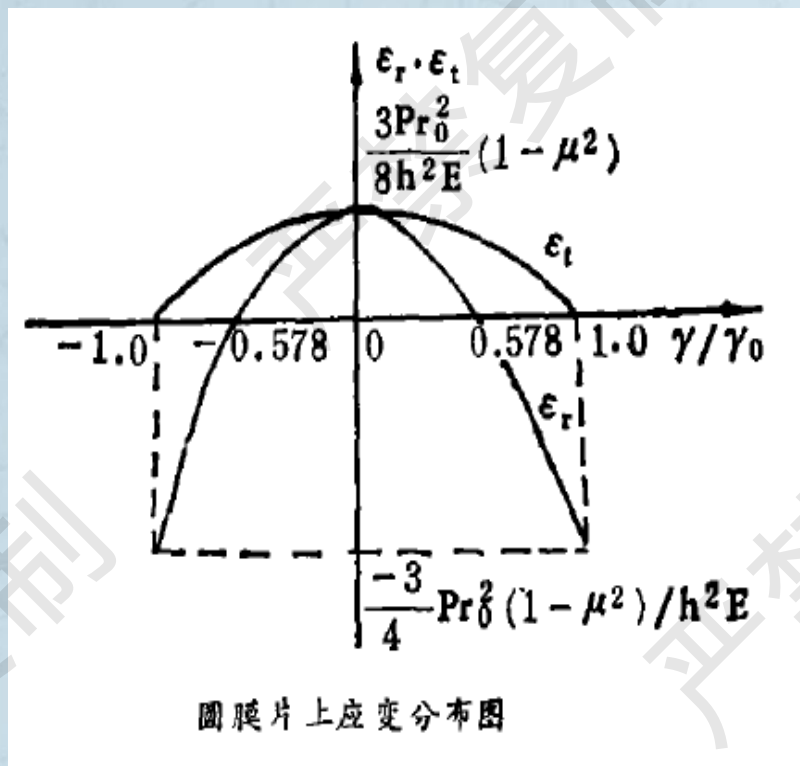


5 薄膜水听器

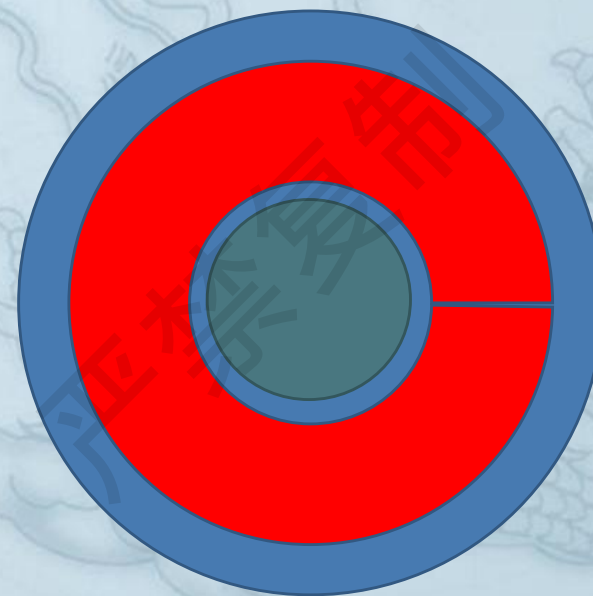


水下标定环境

5 薄膜水听器

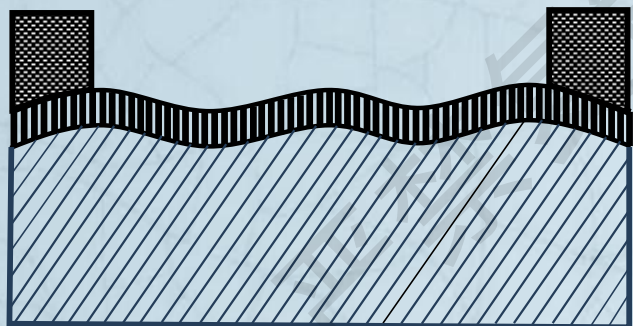


$$D_{33} + D_{31}$$



5 薄膜水听器

陶瓷基MEMS 高灵敏水听器



平板型结构

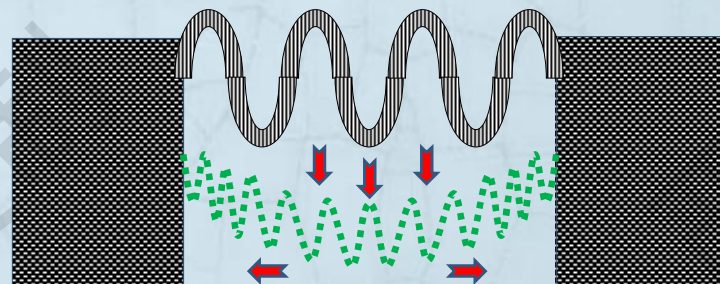
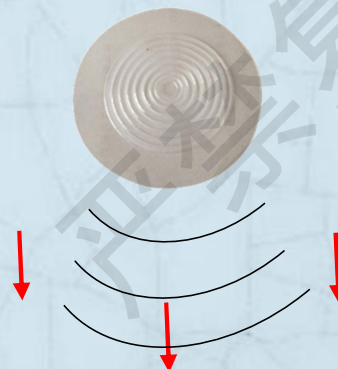
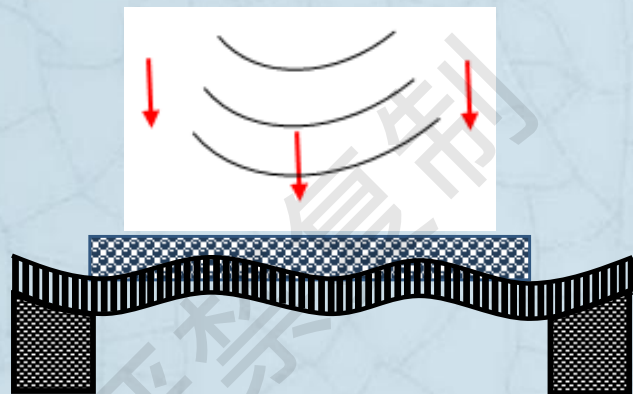


波纹型结构



硅基SOI
10 μ m

陶瓷基
1 ~ 5 μ m



d33 与 d21协同作用 → 提高灵敏度

成熟-装备: *PZT* d33 400pC/N(60-300)

热点-研究: AlN d33 5.5 pC/N (27 掺钪Sc)

本项目: *PZN-PT* D33+D31 1800-2400 pC/N
PMN-PT