



目 录

- 第1章 概 述
- 第2章 智能传感器系统中经典传感技术基础
- 第3章 不同集成度智能传感器系统介绍
- 第4章 智能传感器的集成技术
- 第5章 智能传感器系统智能化功能的实现方法
- 第6章 通信功能与总线接口
- 第7章 智能技术在传感器系统中的应用
- 第8章 智能传感器系统的设计与应用
- 第9章 无线传感器网络技术概述





第4章 智能传感器的集成技术

要 点：

- ◆ 集成电路工艺及典型元件电路的示例；
- ◆ 微机械工艺及微机械结构的示例；
- ◆ 集成智能传感器系统示例。





第4章 智能传感器的集成技术

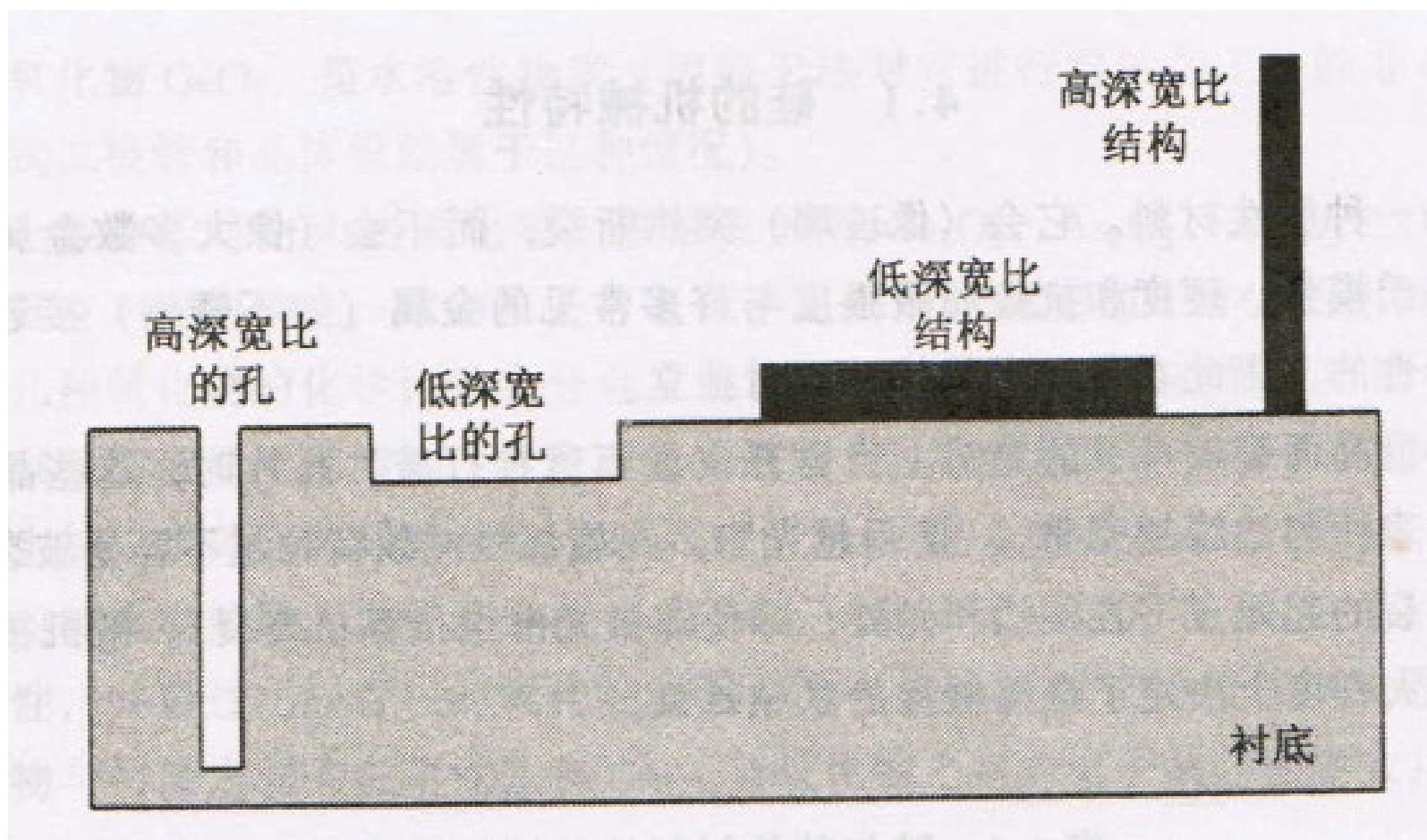
集成电路的基本工艺——制作传感器的电路部分，主要包括：材料的生长、扩散、离子注入、外延、光刻、腐蚀等。

微机械加工技术是在集成电路工艺的基础上发展起来的，制作传感器的敏感单元。

推荐一本参考书：

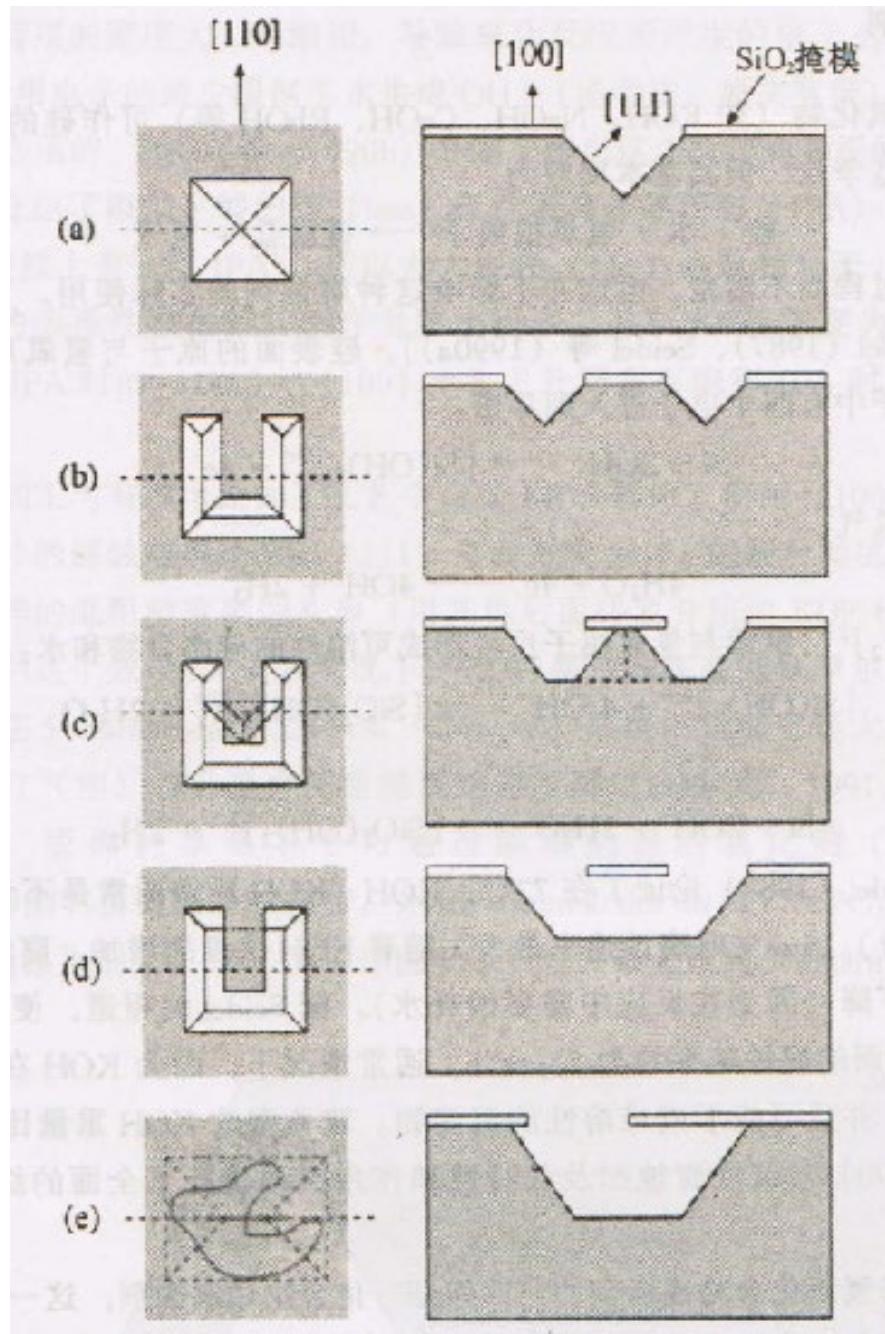
《微传感器与微执行器全书》(MICROMACHINED TRANSDUCERS SOURCE BOOK) [美]Gregory T. A. Kovacs 张文栋等译 [北京]科学出版社





不同深宽比示意图





(100)
硅片
各向
异性
腐蚀
图

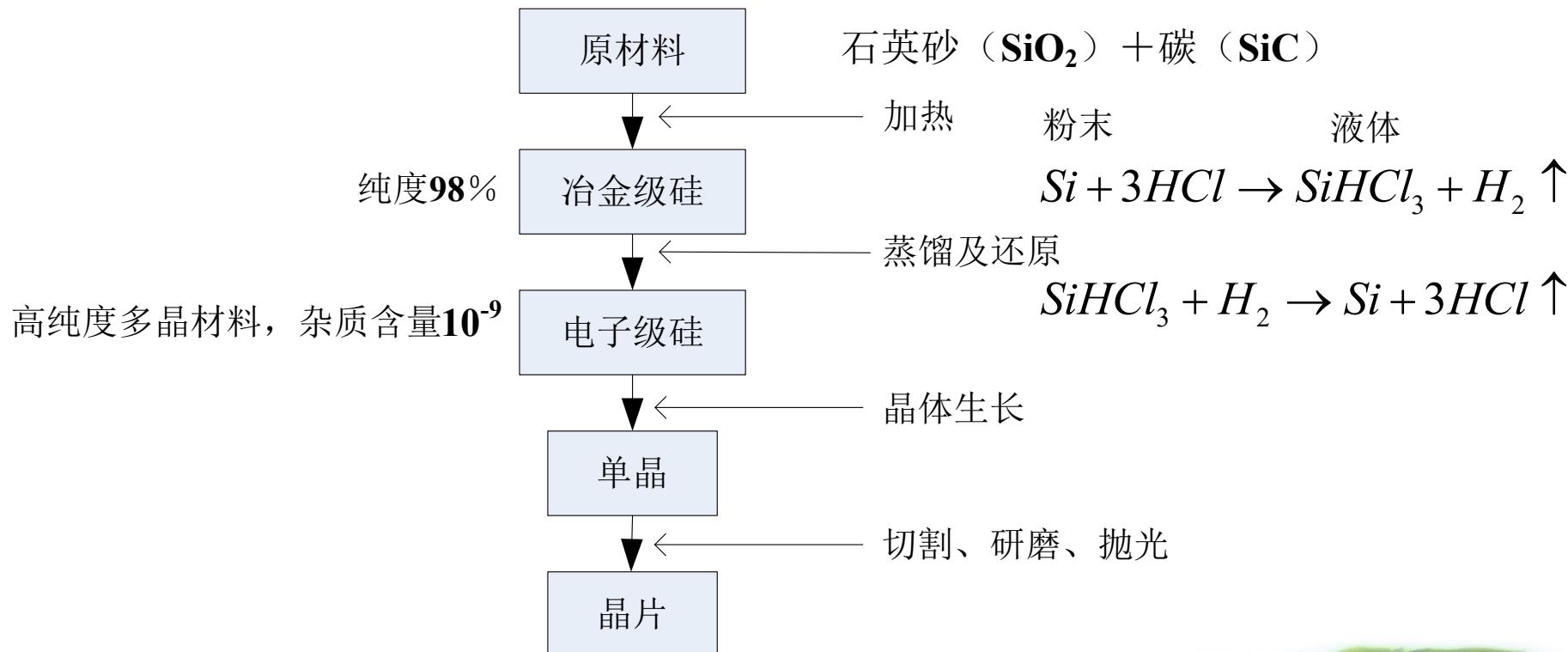


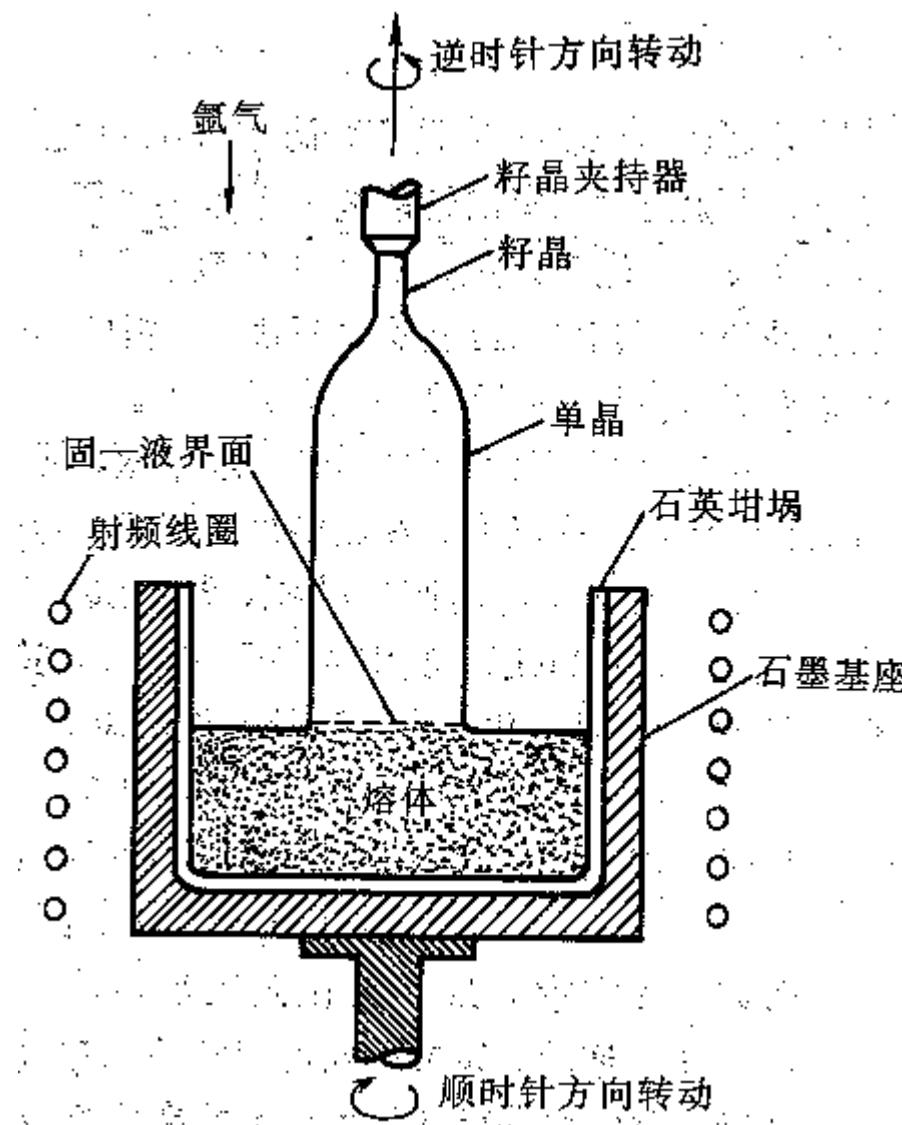


§ 4.1 集成电路的基本工艺

§ 4.1.1 晶片的制备

单晶硅片是制造半导体智能传感器最主要的材料，所以有必要先了解单晶硅片是怎么制造出来的。





直拉单晶炉





介绍生长单晶硅的装置：

- 1) 炉子：包括石英坩埚、石墨基座、旋转装置、加热元件及电源；
- 2) 单晶提拉机构：籽晶夹持器及旋转装置；
- 3) 保护气体控制系统：气体源、流量控制装置、抽气系统。

对籽晶的要求：晶向要合适[111]；

要使生长出来的晶体有一定的掺杂浓度，在熔体中加入一定量的掺杂剂；

切片的主要参数：表面晶向、厚度、斜度及弯曲度。

衬底材料的选择：

- 1) 导电类型和电阻率：

力敏器件多数是选N型单晶硅作衬底材料，采用扩散或离子注入工艺制作P型掺杂电阻。

* 同一电阻率的P型硅掺杂浓度高于N型掺杂浓度。掺杂浓度越高，





温度漂移越小。

* 相同温度相同表面杂质浓度下，P型层的压阻系数比N型层的高，有利于提高灵敏度。

2) 位错密度：

位错是单晶硅的原子排列上出现一种缺陷；位错会加快杂质扩散速度，影响隔离效果，产生应力集中。

3) 晶向和晶面

压阻效应与晶向有关，P型硅的压阻效应是 $[111] > [110] > [100]$ ；硅单晶的原子密度是以晶面 $(111) > (110) > (100)$ 的次序递减，而扩散速度、腐蚀速度以 $(111) < (110) < (100)$ 的顺序递增。

制作力敏器件，为加快扩散速度，缩短腐蚀时间和提高器件的稳定性，应选取 (100) 、 (110) 晶面。

4) 衬底切割的质量要求





- * 硅片厚度公差 $\pm 0.015\text{mm}$;
- * 平行度 0.02mm ;
- * 晶向偏差： $<1^\circ$ ；
- * 弯曲度：影响加工量，一般要求<磨片磨削量的 $1/2$ 。

§ 4.1.2 外延

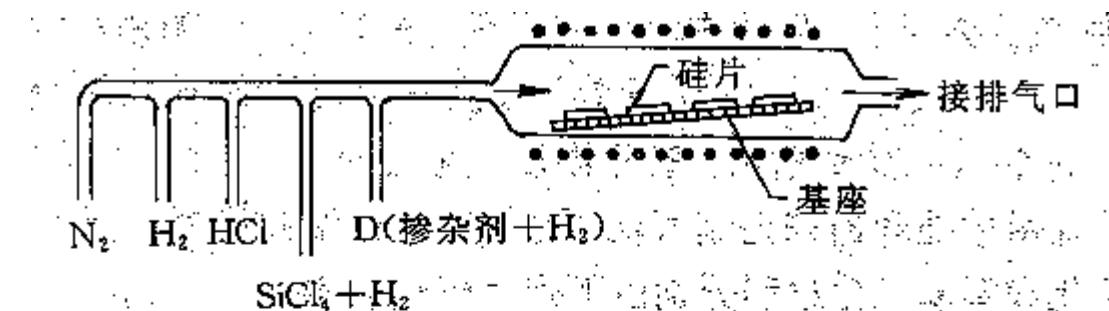
作用：控制杂质分布，优化器件和电路性能

方法：**气相外延（VPC）**；液相外延（LPC）；分子束外延（MBE）。

主要目的：通过一种化学反应的方式，在硅基片的表面生长一层所需的膜层，如掺杂层的生成。

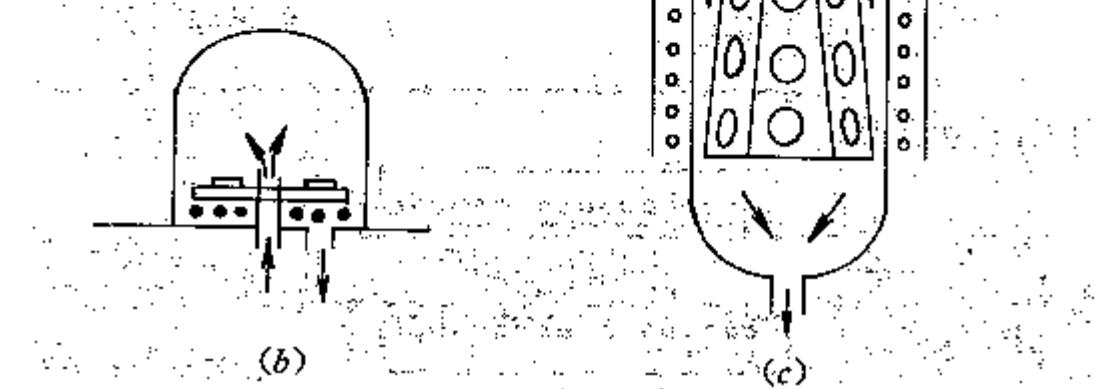
优点：在远低于熔点的温度下生长。





→ 气流方向

- 射频加热器
- 辐射加热器



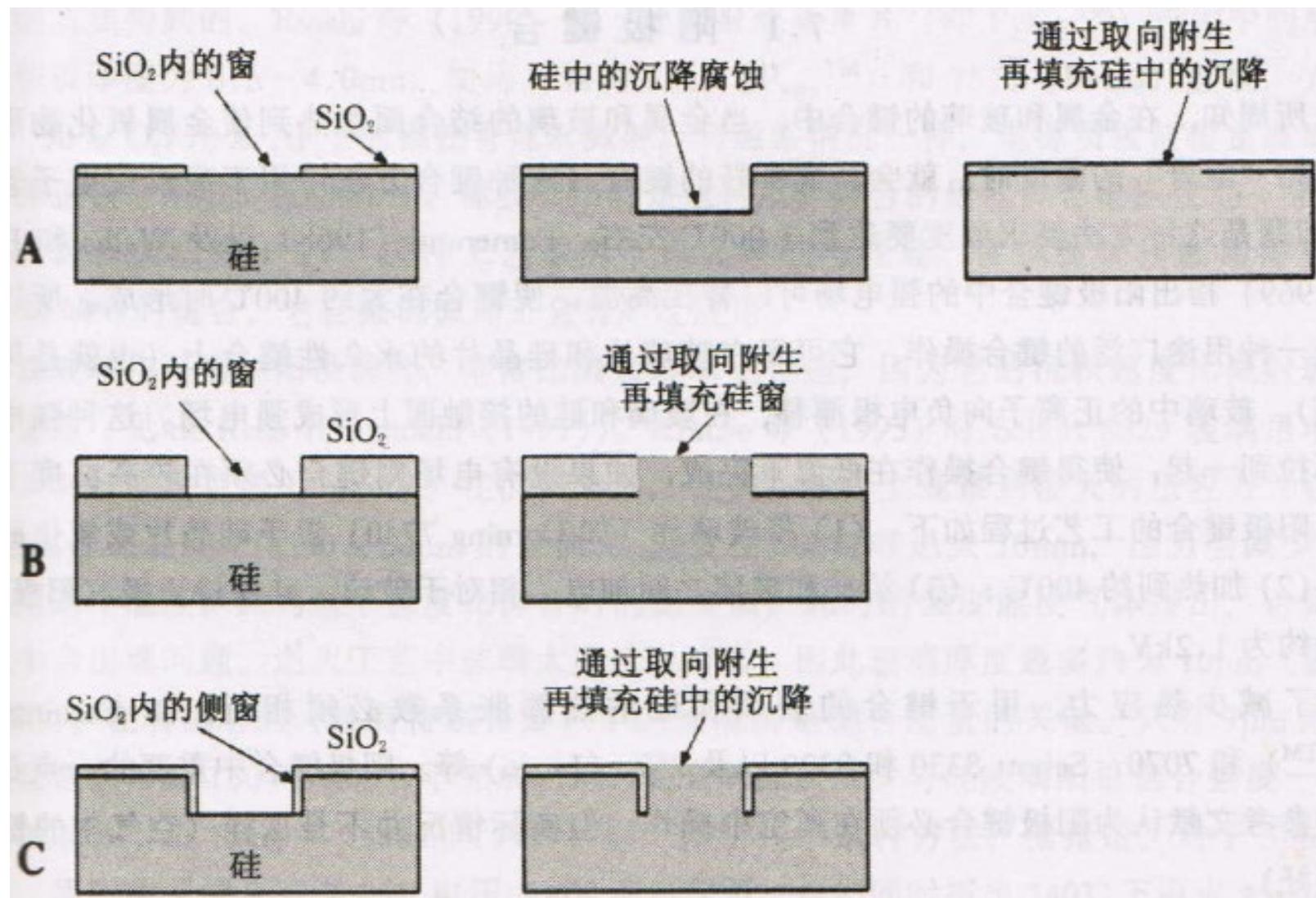
气相外延常用的三种基座

(a) 水平型

(b) 圆盘型

(c) 桶型





选择性外延生长的三种可能方案





§ 4.1.3 热氧化

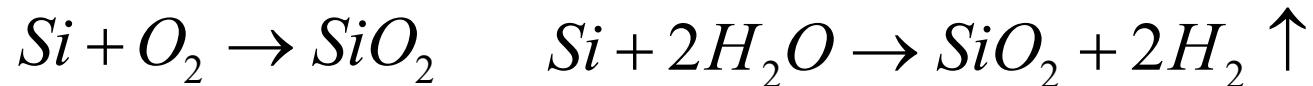
主要是生成半导体电路中所需的氧化层，如MOSFET电路中的栅氧化层，场氧化层。

氧化层的作用：隔离层、钝化层

方法：干氧氧化（高纯度干燥氧气） 湿氧氧化（高纯度水蒸气）

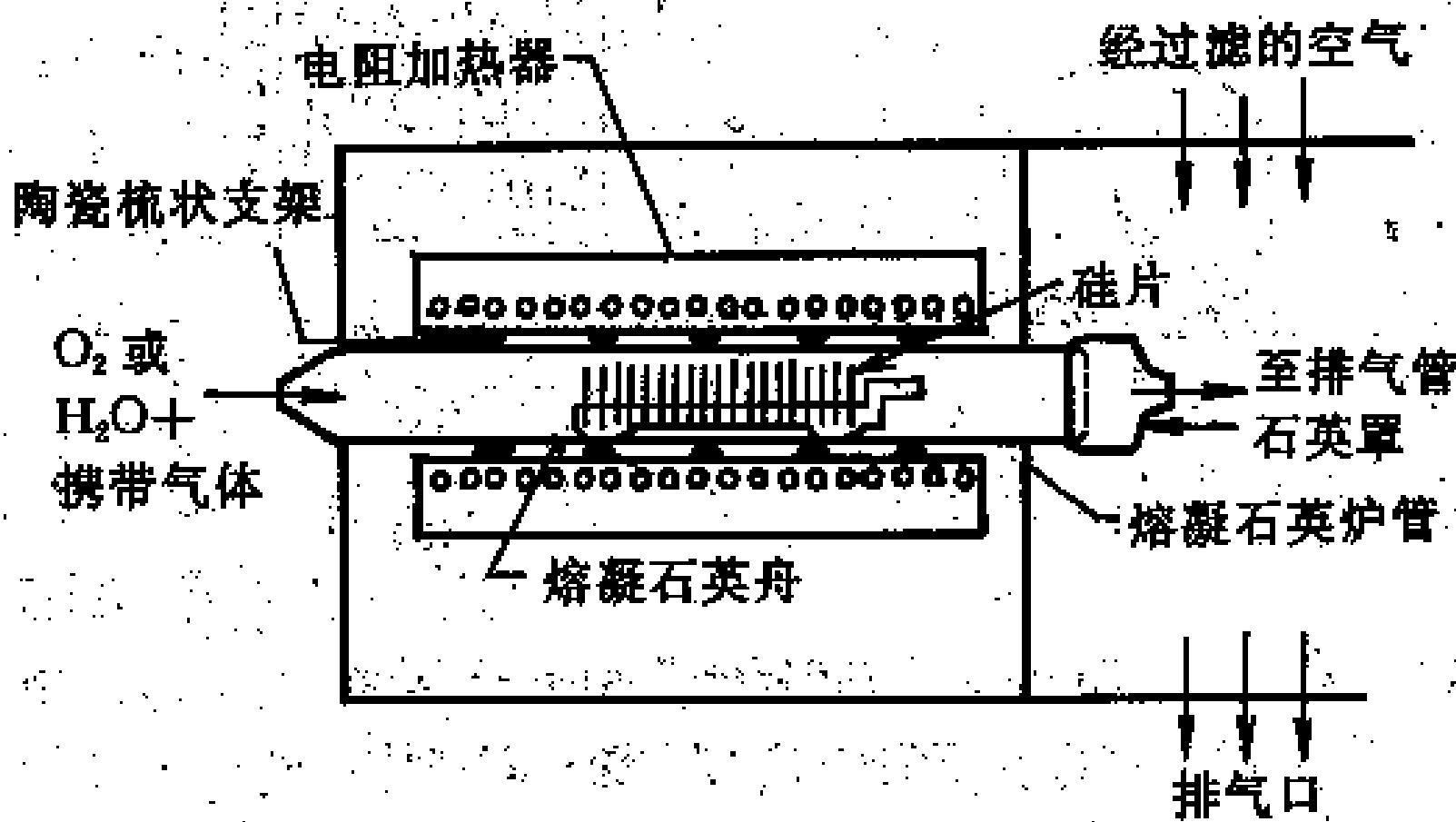
特点：干氧氧化（慢、性能好） 湿氧氧化（快，用于较厚氧化层）

反应条件：T：900~1000°C；v（气体流量）：1cm³/s，ΔT=±1°C；



钝化膜的作用：起掩蔽、保护、绝缘等作用；防止高温下硅表面以及硅中杂质的挥发，以及化学处理而引起的器件电学性能下降。





电阻加热氧化炉结构示意图





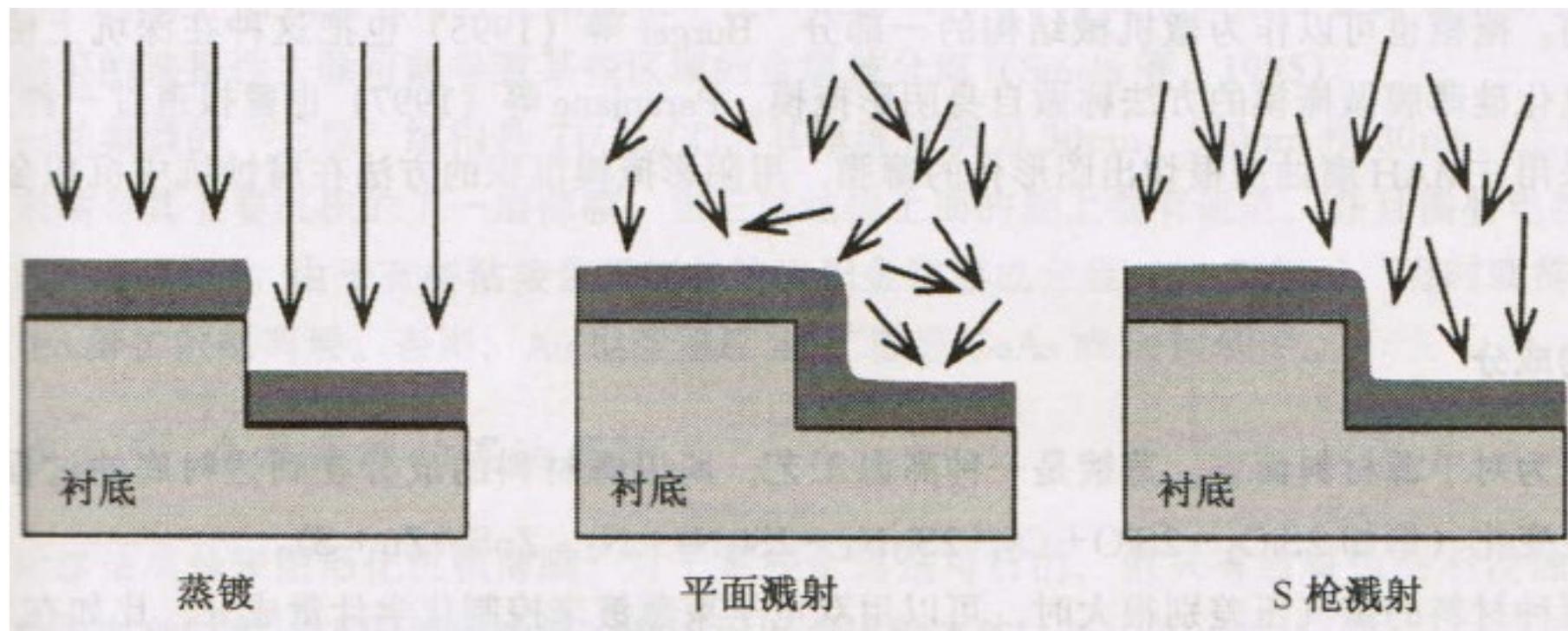
§ 4.1.4 物理气相沉积

作用：淀积一些金属材料，作为电极或连线；对器件进行金属化。

方法：真空蒸发淀积（辉光放电）——用于铝等熔点较低的材料；
物理溅射淀积（分直流、射频、磁控、离子束）——用于难熔金属或化合物材料。

直流	射频	磁控溅射	离子束
气压高 (1.3~13.3Pa)	0.133Pa	0.133Pa	(1.33×10^{-3} Pa) 高真空
只能用于导电材料	用于绝缘靶	薄膜均匀性好，淀积速率高1 μm/min	可用于绝缘靶，淀积速率高





蒸镀、平面溅射、S枪溅射台阶覆盖能力示意图





§ 4.1.5 化学气相沉积

作用：淀积用于分立器件和集成电路绝缘和钝化的介质膜，与物理气相淀积相比产生化学反应。

方法：

常压化学气相淀积 低压化学气相淀积 等离子体化学气相淀积

CVD

LPCVD

PCVD

用于金属化工艺

用于钝化器件、绝缘膜

作器件最终钝化膜

温度高

温度中等 (750°C)

温度低 (300°C)

薄膜电阻

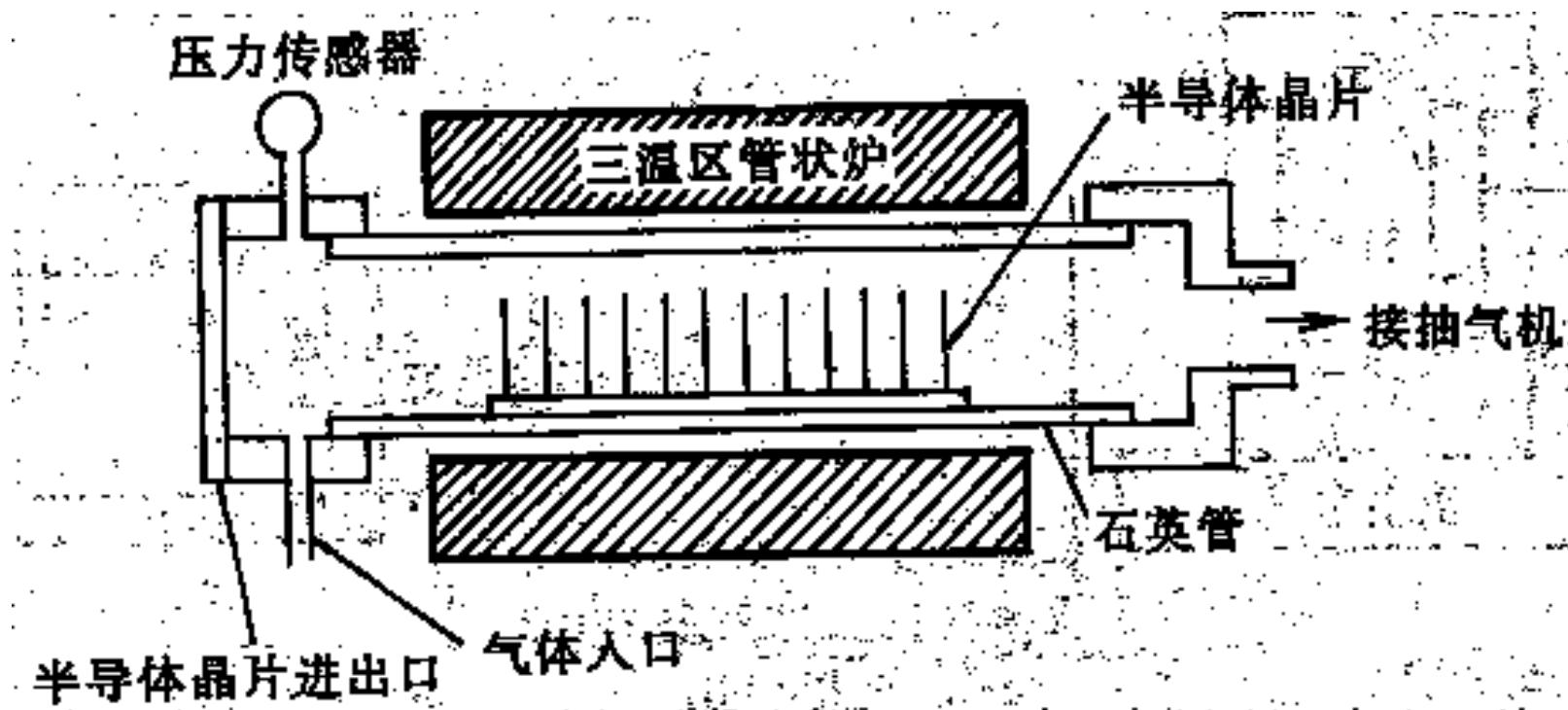
SiO_2 , 氮化硅膜

氮化硅膜

§ 4.1.6 光刻

光刻工艺是利用光刻胶受光照部分与未受光照部分溶解特性的巨大差异在衬底表面制作图形的技术。这有点类似照相底片的功能。





热壁低压化学气相沉积反应器原理图





1、光刻工艺流程

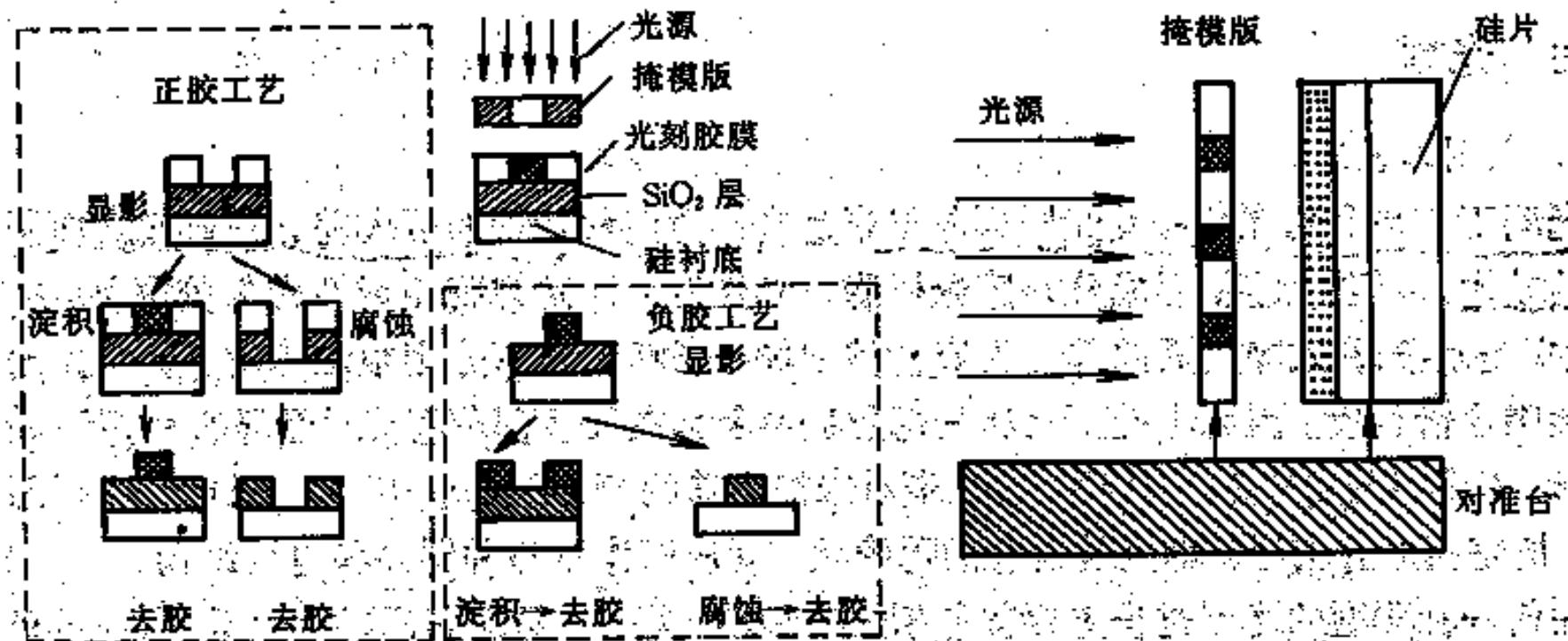
光刻胶分：正性光刻胶（曝光部分被溶解）；负性光刻胶（又叫反转片）。

工艺步骤：清洗、烘烤→涂胶（厚度取决于光刻胶种类、旋转速度、液态胶粘度）→前烘（使胶层中的溶剂挥发（红外线、热板、循环热风）增强粘附能力；提高耐磨性；提高和稳定感光灵敏度）→曝光（使胶层起光化学反应，方式有掩膜曝光、电子束曝光）→显影（样品放入显影液，使部分胶层溶解，分正负性）→后烘（显影后的样品放在一定温度下烘烤，使其硬化，又叫坚膜）→腐蚀或淀积（刻蚀掉下面的材料，或淀积所需的材料）→去胶（去除作为保护膜的光刻胶）。

2、紫外光曝光

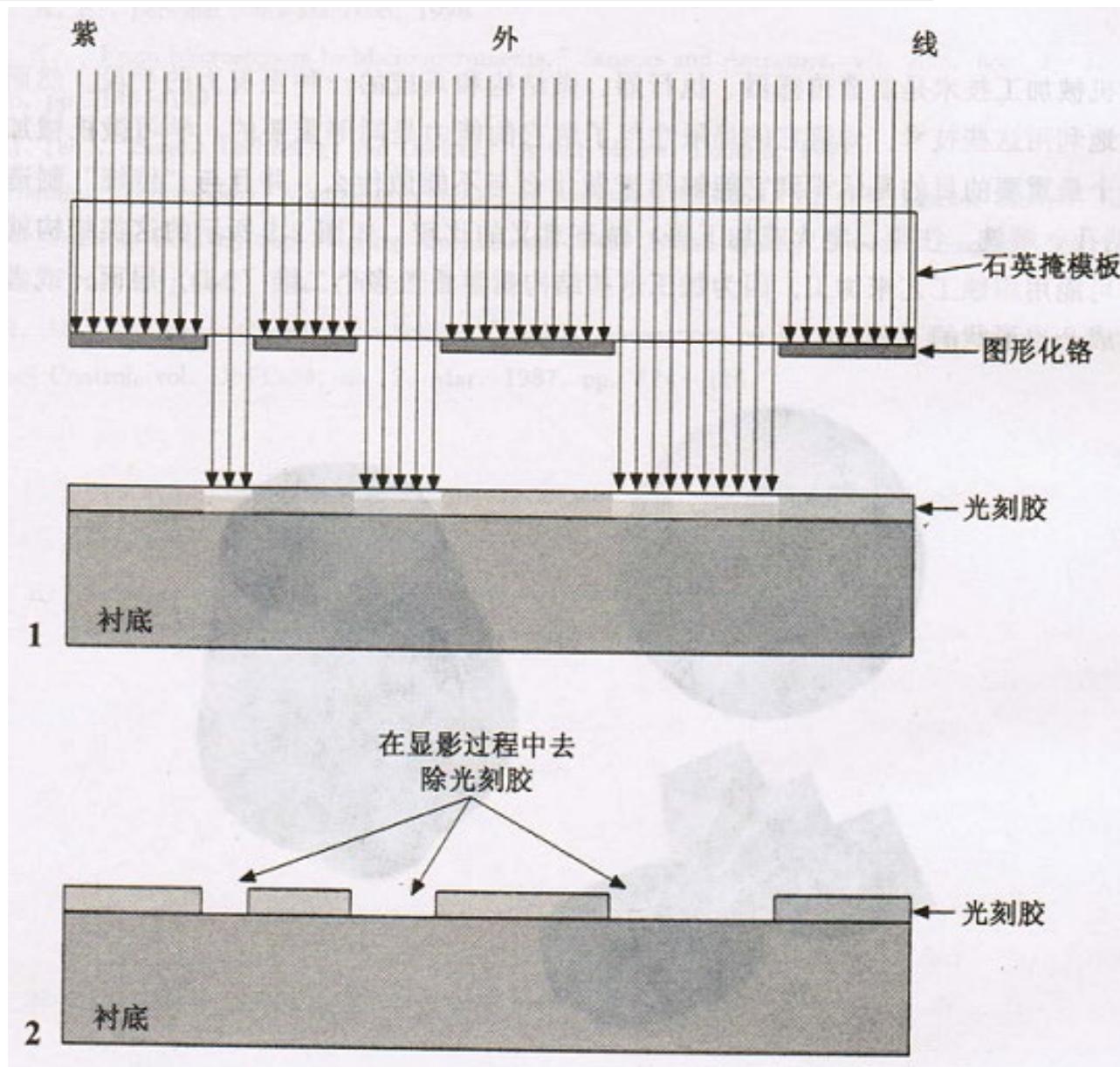
光刻光源： $CeCl_2$ 、 Ar^+ 准分子激光器：高亮度、高单色性、方向性好。





光刻主要工艺流程

接近式暴光装置示意图



在微机械加工中大量应用的基本光刻工艺



曝光方式：接触式、接近式（分辨率： $R = \frac{1}{2.8\sqrt{s}\lambda}$ ）、投影式（ $\delta Y = 0.61 \frac{\lambda}{N \cdot A}$ ）A：数值孔径。
上述曝光方式受衍射效应的影响。

3、几种新型的曝光系统

元件尺寸的减小，要求曝光系统的分辨率高。

- 1) 选用短波长的光源，如x射线（ $\lambda = 0.4 \sim 5 \text{ nm}$ ）；
- 2) 采用电子束曝光， $\lambda = 0.01 \text{ nm}$ ，但速度慢。

§ 4.1.7 刻蚀

在IC工艺和微机械加工工艺中占重要地位。

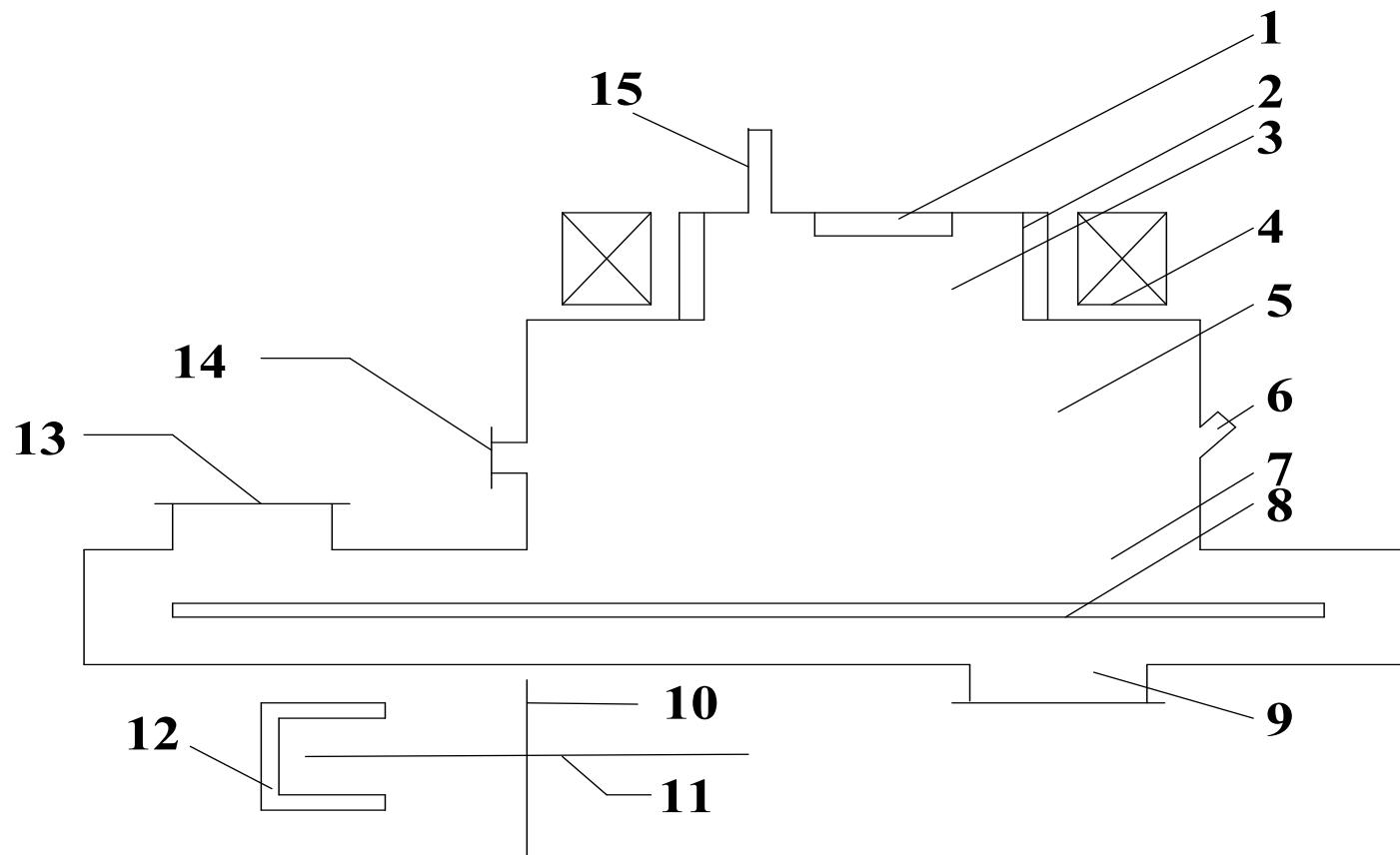
作用：把经过曝光、显形后光刻胶图形中下层材料的裸露部分去掉。

方法：各向同性腐蚀和各向异性腐蚀（或称为干法腐蚀与湿法腐蚀），干法效果好；湿法精度低，效果差。





简单介绍：等离子体刻蚀法（见下图）



1. 微波窗口 2. 水冷套 3. 等离子体发生室 4. 磁场线圈 5. 等离子体约束室
6. 观察窗口 7. 处理室 8. 基片架 9. 抽气口 10. 电机转轴 11. 光电盘
12. 光电传感器 13. 门 14. 探针口 15. 气体进口





§ 4.1.8 扩 散

作用：用于对衬底进行选择掺杂，以形成N型区或P型区，例如：制作P—N结。

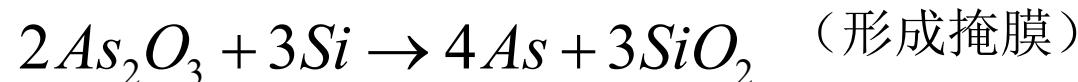
方法：恒定表面浓度扩散；恒定杂质总量扩散

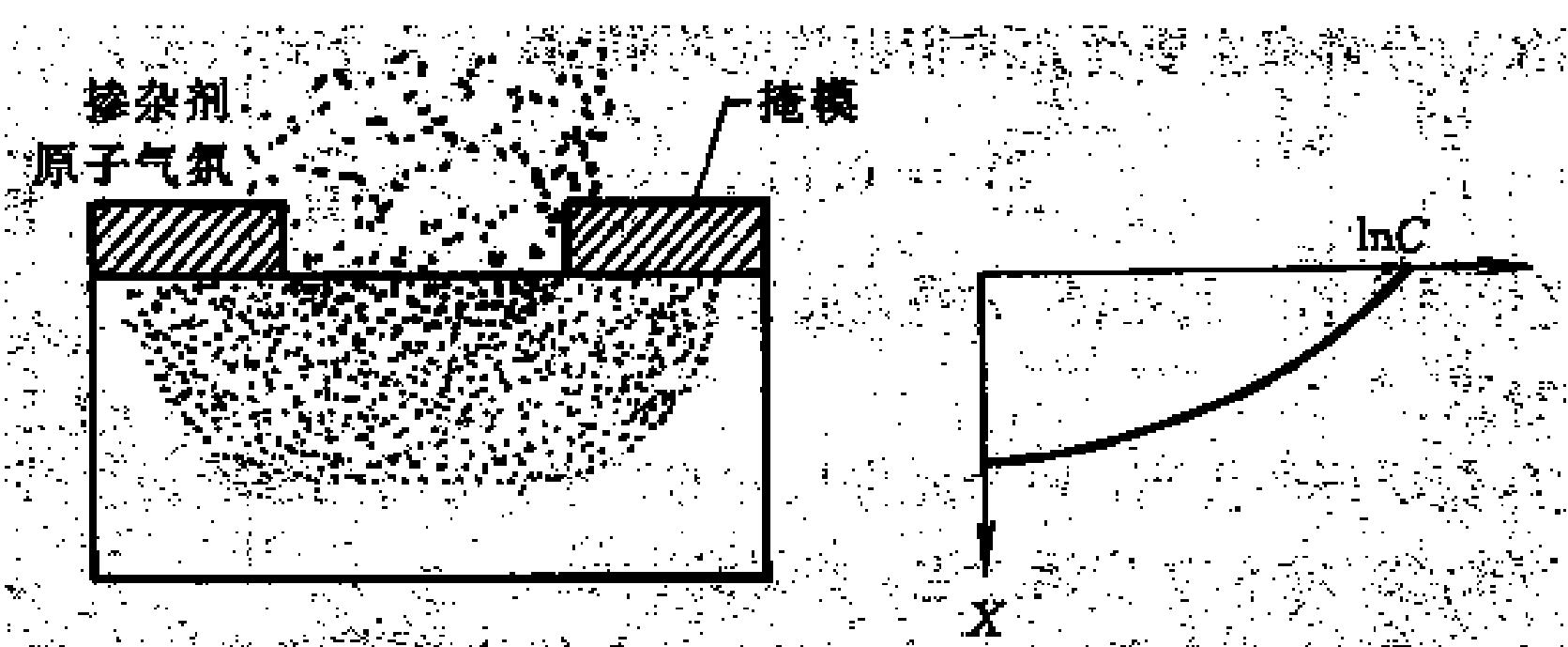
扩散效果：取决于扩散温度和扩散时间。

集成电路工艺中，一般采用两步扩散法：预淀积扩散、主扩散（或称再分布扩散）。

扩散设备：专用的扩散炉（与热氧化类似），对于硅： $T=800\sim1000^{\circ}\text{C}$ ；

扩散源：固态源： As_2O_3 、 P_2O_5 ；液态源： AsAl_3 、 POCl_3 ；气态源： AsH_3 、 PH_3 。





扩散杂质在衬底中的分布





§ 4.1.9 离子注入

作用：将一定能量的带电粒子掺入到硅等衬底中，用来改变衬底的电学性能，与扩散作用类似。

优点：可以精确控制掺杂的数量，重复性好，加工温度低。

离子注入系统：

离子源、质量分析器、(可变狭缝)、加速管、平面扫描电路、靶。

高能离子能量消耗机制：

核阻止过程

电子阻止过程

能量小

砷离子（重离子）

硼离子（轻离子）

磷离子介于两者之间，临界能量是130KeV

解释离子注入损伤的概念。

沟道效应：由入射离子对准某一主要晶向时造成，它的射程比在非





晶硅中大很多。

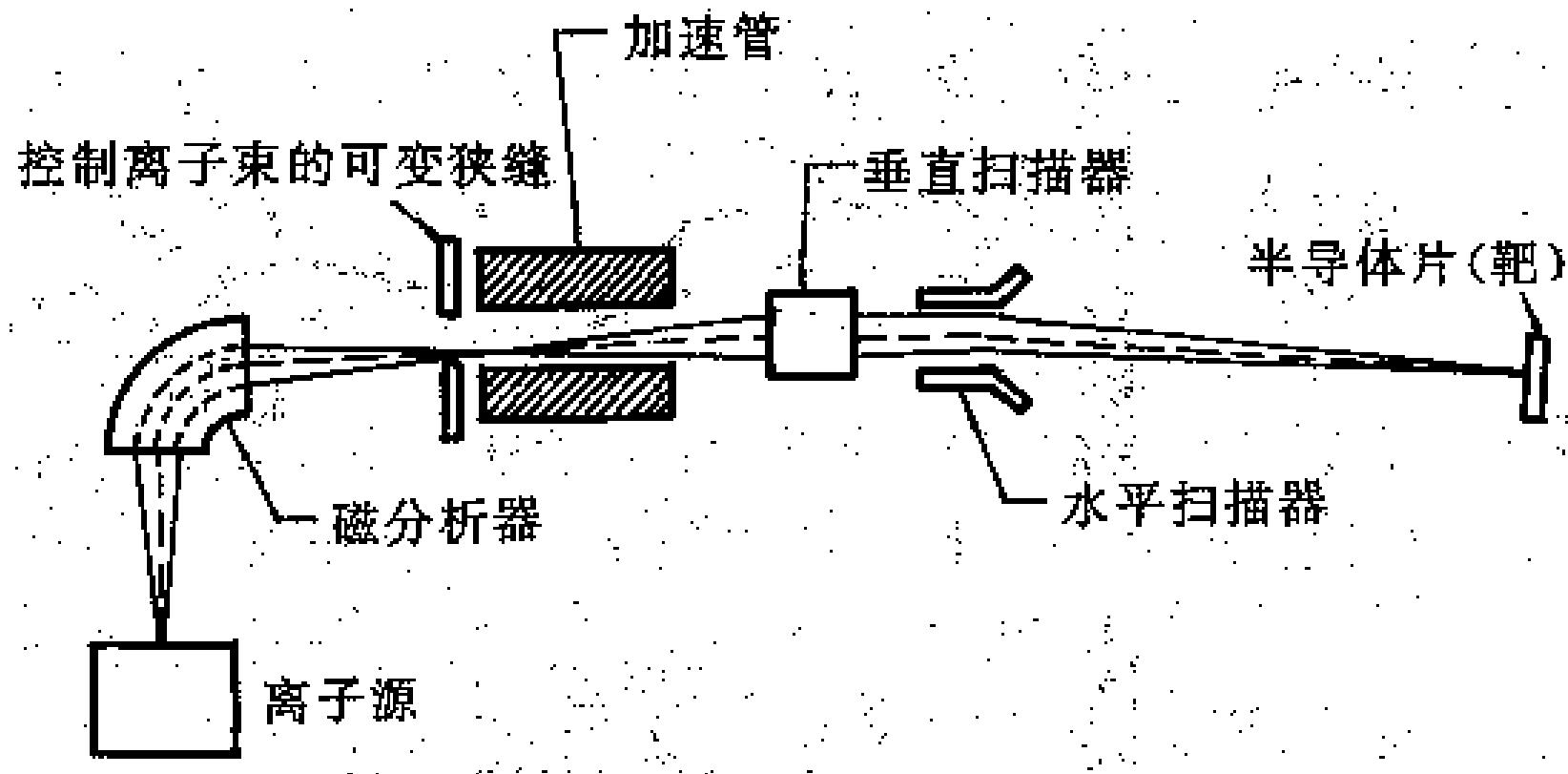
晶格无序：注入离子向晶格转移足够能量，使晶体原子发生移位，当原子移动距离接近原子密度时，单晶材料变成非晶材料。

轻离子的能量被吸收的特点：一开始是电子阻止消耗能量，能量减低后变为核阻止消耗能量。

损伤区的恢复：退火，使注入离子进入晶格点阵（又叫激活）

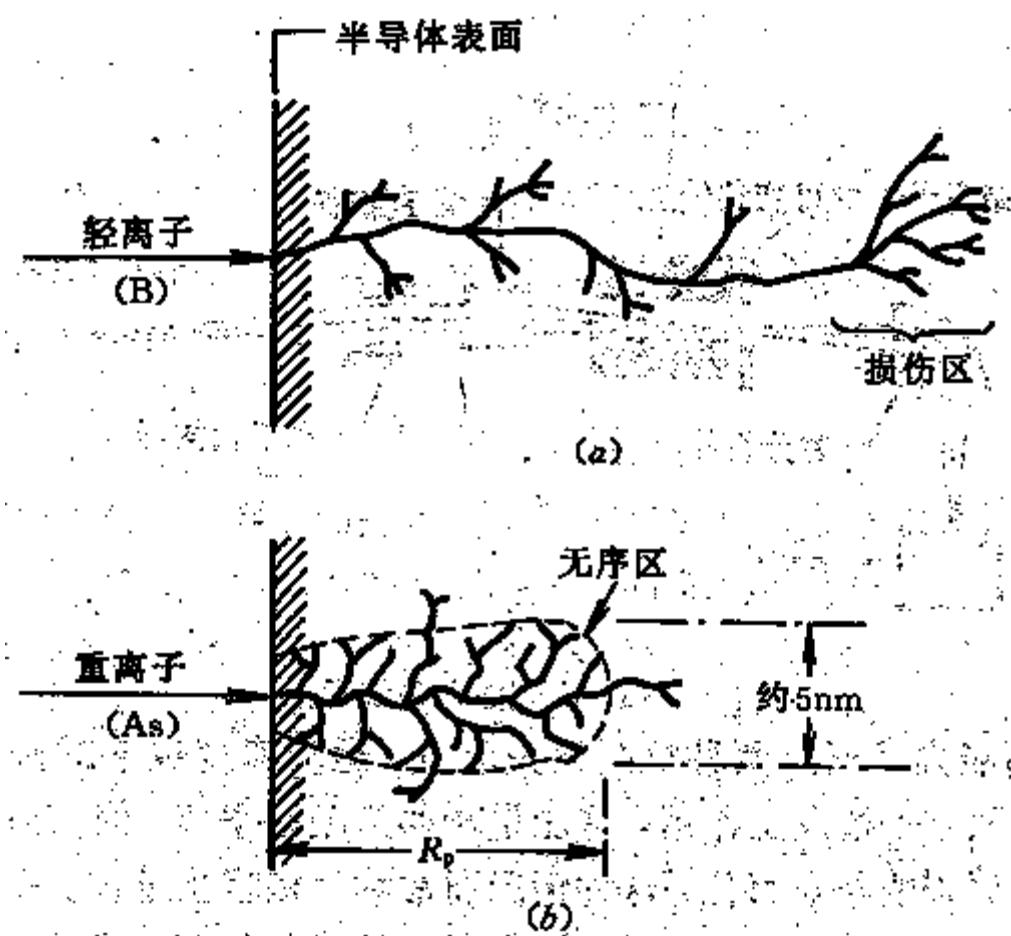
退火方法：扩散炉（时间长，效果差）；激光、电子束（时间短，低温，效果好）。





离子注入系统示意图





离子注入形成无序区





§ 4.2 典型的集成电路元件制作工艺

集成电路的基本构成单元：有源元件（二极管、三极管、场效应管）、无源元件（电阻、电容、电感）。

§ 4.2.1 典型的集成电路制造流程

设计、掩模版制造、芯片制造（扩散、氧化、离子注入、刻蚀）、封装、测试等一些步骤，下图是其流程图。CPU之类大规模集成电路的制作前后有两百多道工序。

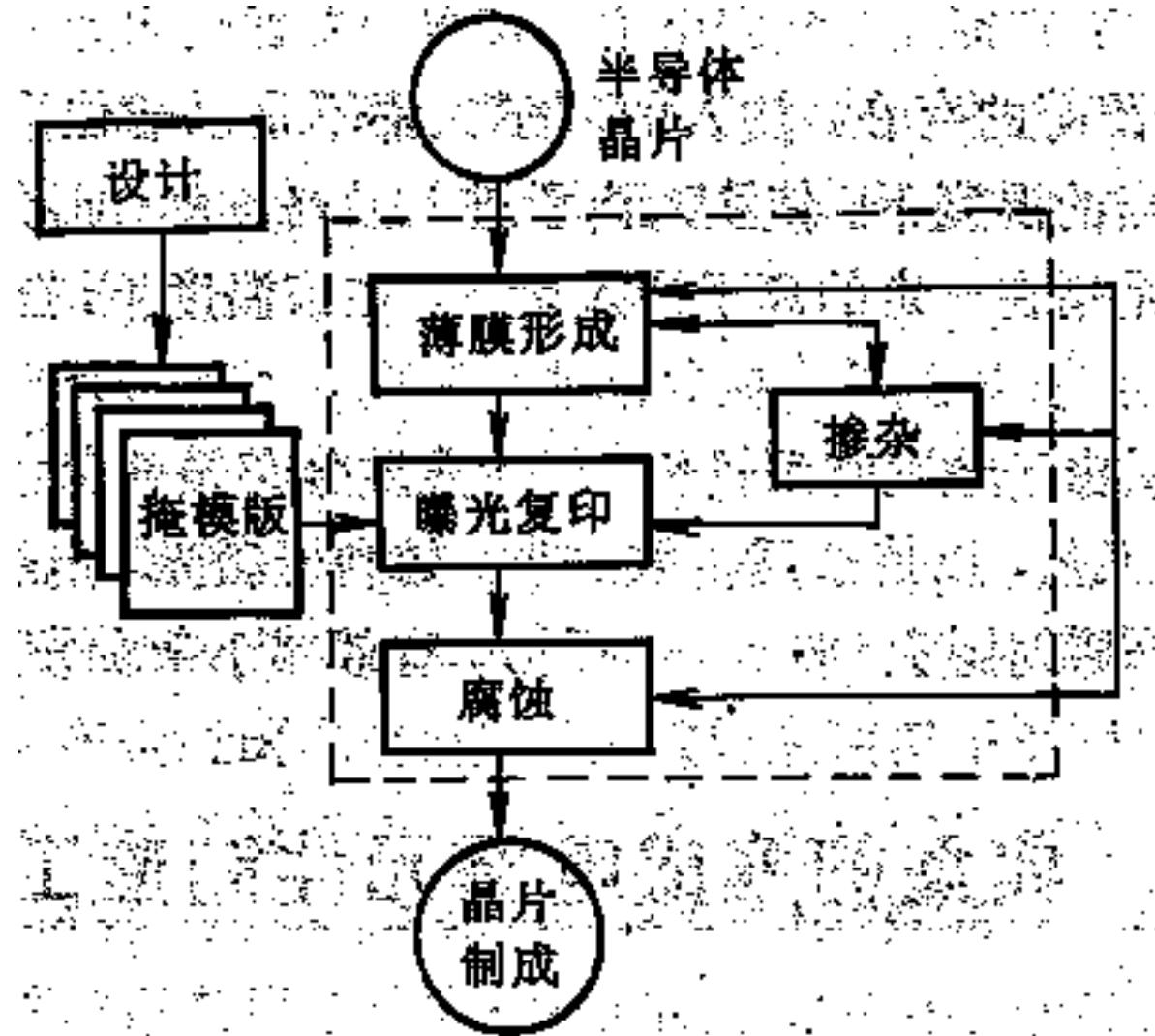
1) 设计

根据功能要求，借助CAD设计电路并生成版图→转化为光刻掩模板。

2) 芯片制造

利用前面所述的各种工艺，根据实际使用的需要，将各种加工方法进行合理的组合，最终将各个掩膜板的图形逐次转移到半导体晶片表面上，获得最终的IC器件。如果在一个晶片上制造了多个相同芯片，则还要进行划片或激光切割将芯片分开。





集成电路制造的主要步骤





3) 封装：提供合适的散热和引线连接条件，如带窗口的ROM。

4) 测试

§ 4.2.2 集成电路电阻器

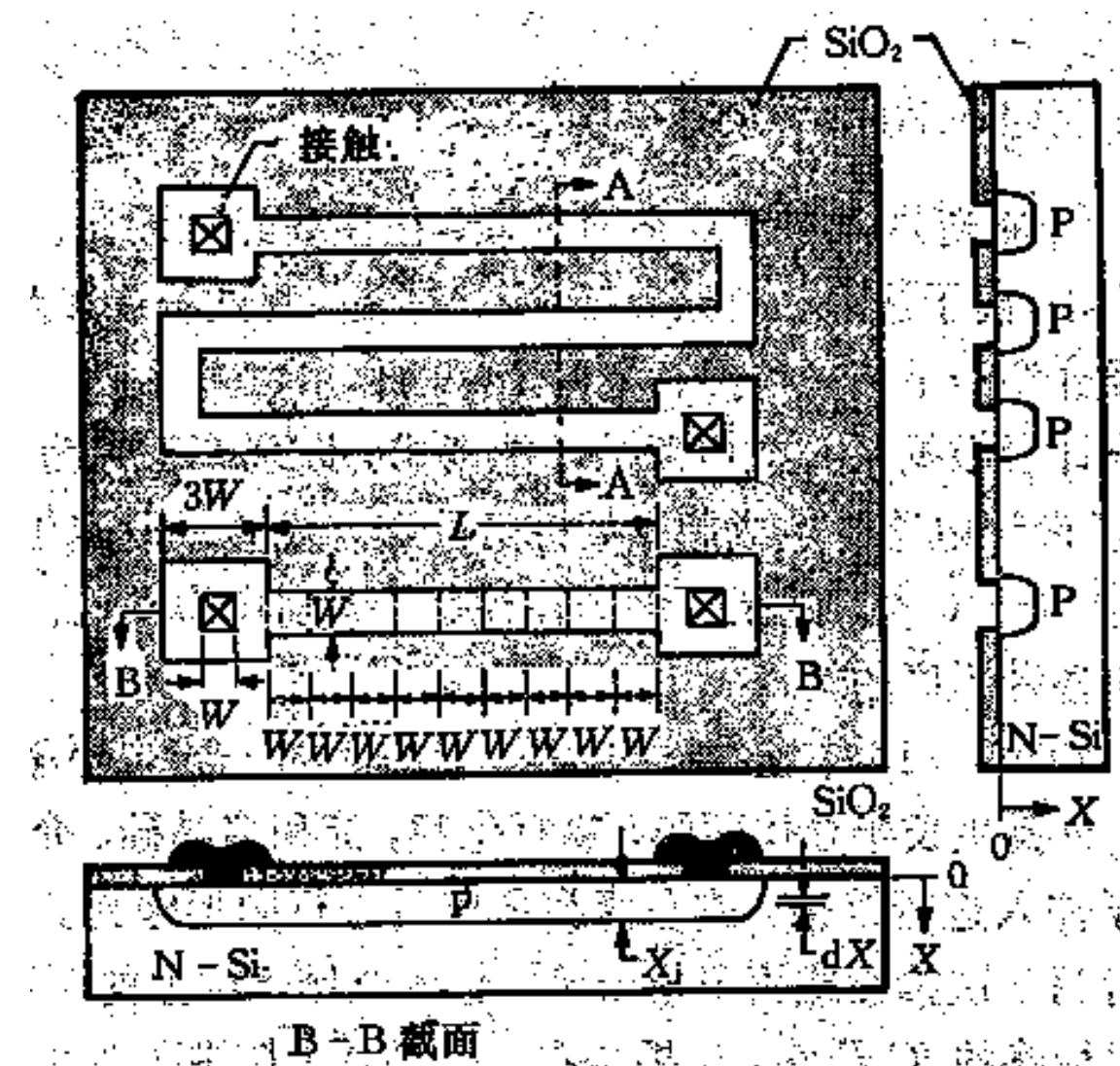
制作工艺：硅衬底材料 (N-Si) $\xrightarrow{\text{热氧化}}$ 二氧化硅层 $\xrightarrow{\text{光刻}}$
形成制作电阻的图形 $\xrightarrow[\text{扩散}]{\text{离子注入}}$ 形成电阻器。

$R = \frac{L}{W} \left[\frac{1}{g} \right]$; $\frac{1}{g}$ 通常用符号 $R^* \square$ 表示，称为薄层电阻，单位： Ω / \square^{**} 。

§ 4.2.3 集成电路电容器

硅衬底材料 $\xrightarrow{\text{热氧化}}$ 二氧化硅层 $\xrightarrow{\text{光刻}}$ 形成所需的窗口
 $\xrightarrow[\text{扩散}]{\text{离子注入}}$ 形成 P^+ 区 \rightarrow 集成MOS电容器。





集成电阻器





§ 4.2.4 电感的制造

用于测量数据的无线传递，能量的无线发送，微执行器的电磁驱动。

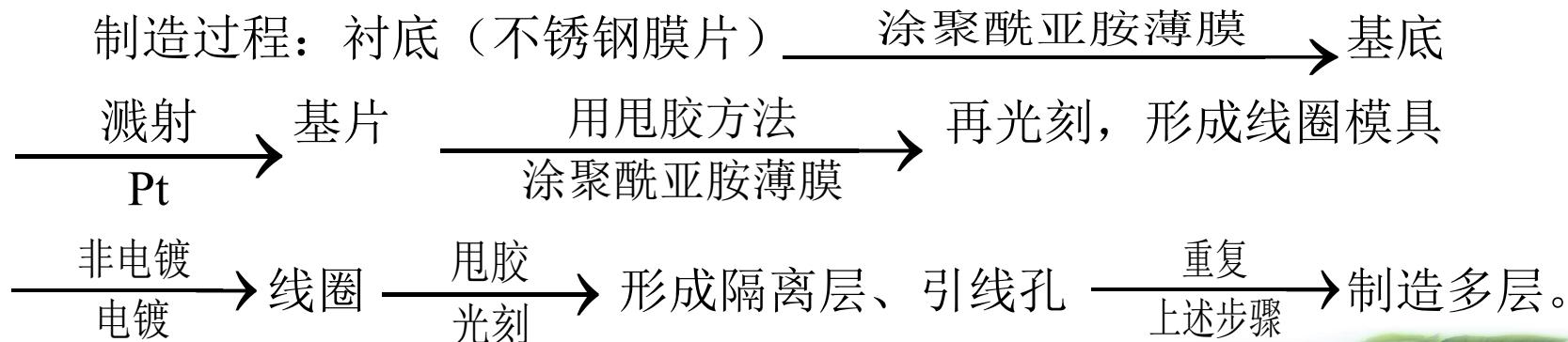
制造方法：

1) 在铜膜上制作电感掩膜，然后在腐蚀液中进行腐蚀；

2) 利用电感掩膜在衬底上淀积活化层，接着在活化层上电镀厚铜层。

上述两种方法只能制作微型电感。

3) 利用光刻胶材料制作电感模具，在模具中电镀生长铜线圈层，该方法可制作多层次电感线圈。





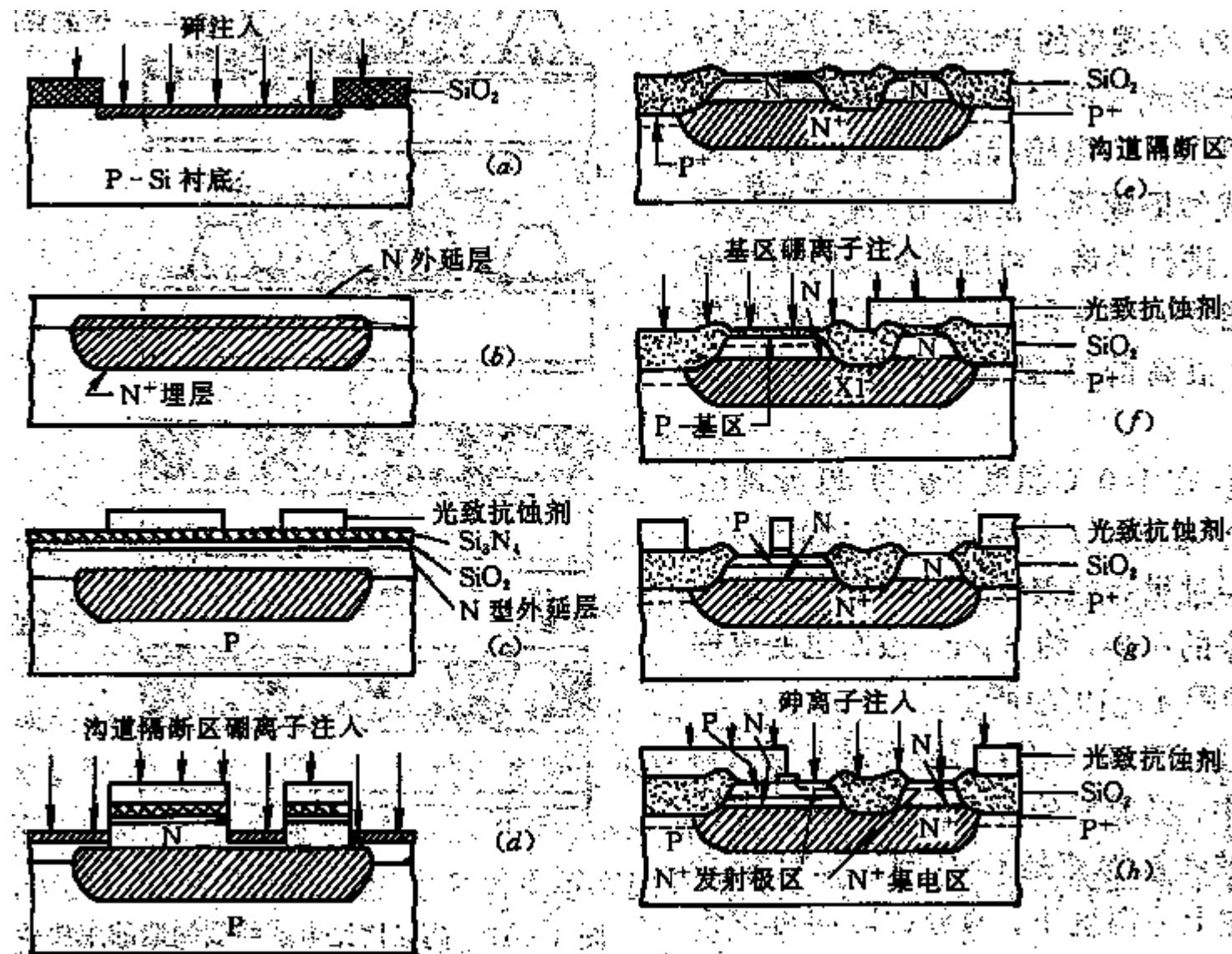
§ 4.2.5 双极性晶体管

双极性晶体管的制造过程比较复杂，它总共包括：薄膜形成6次；图形曝光6次；刻蚀4次；离子注入4次，共分6步完成制作过程。

IC中的双极晶体管大多是N—P—N型。

- 1) 形成埋层，减少集电极串联电阻；
- 2) 生长N型外延层，它的厚度和掺杂浓度决定于工作电压；
- 3) 形成横向氧化物隔离区，将发射区与集电区隔开；
- 4) 形成基区，基区与发射区位置比较接近；
- 5) 形成发射区；
- 6) 用金属化工艺形成基极、发射极、集电极引出电极。





双极晶体管制造过程截面图





§ 4.3 微机械工艺的主要技术

集成电路工艺基本上是平面工艺，而微机械工艺从某种角度上来说是立体工艺，它不仅仅用于微传感器的加工，而且用于电力电子器件、真空场发射阵列器件、扫描隧道显微镜中的微探针头、微电子机械系统等。

§ 4.3.1 SOI晶片 (Silicon on Insulator)

作用：将有源部分（电路部分）与敏感部分隔开，同时与恶劣环境隔开。

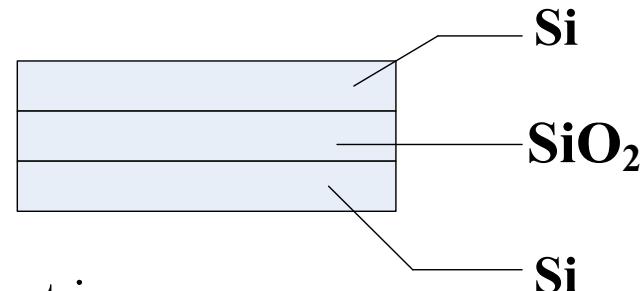
构成：

制备方法：

- 1) SIMOX (Separation by Ion Implantation of oxygen) 氧离子注入；

- 2) SDB (Silicon Wafer Direct Bonding) 键合；

注意点：防止衬底非晶化。





§ 4.3.2 硅的各向异性刻蚀技术

基于硅的不同晶面具有不同的腐蚀速率的特性，在硅衬底上加工出各种各样的微结构。（100）：最快；（110）：一般；（111）：最慢。

1、 腐蚀剂的种类

- a) 有机腐蚀剂：EDP（乙二胺，邻苯二酚，水）；联胺。
- b) 无机腐蚀剂：（碱性）KOH, NaOH水溶液

2、 影响腐蚀性的因素

- a) 腐蚀系统成分配比不同，腐蚀特性不同；
- b) 晶体的晶向及掺杂浓度

例如：在重掺硼（约 10^{20} cm^{-3} ）样品中，腐蚀速率接近于零；这种特性可用于自致停止腐蚀技术（掺硼的P型硅，掺磷的N型硅腐蚀速率随浓度升高而降低变慢）。

- c) 温度：温度越高，腐蚀速率越大。



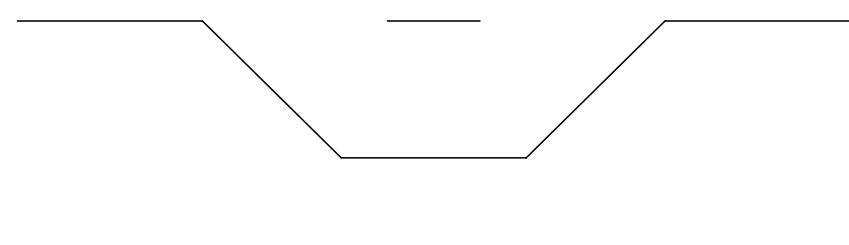


3、各向异性腐蚀的机制

- a) 硅不同晶面的悬挂键密度的不同, $\rho_{(100)} > \rho_{(111)}$;
- b) 由于硅在腐蚀过程中存在表面预钝化层, (111) 面预钝化层容易生长。

4、应用:

- a) 传感器: 悬臂梁, 压力-流量传感器芯片
- b) 电力电子器件: VVMOS;
- c) 场发射阵列;
- d) STM (扫描隧道显微镜) 探头;
- e) 太阳能电池。





§ 4.3.3 干法刻蚀

1、湿法刻蚀的缺点

- 1) 使用化学药品，不利于安全操作和环境保护；
- 2) 腐蚀后要清洗，效率低；
- 3) 由于侧向腐蚀和钻蚀，难以获得高精度的细线条；
- 4) Si_3N_4 、难熔金属难腐蚀。

目前干法刻蚀是VLSI的标准腐蚀技术。

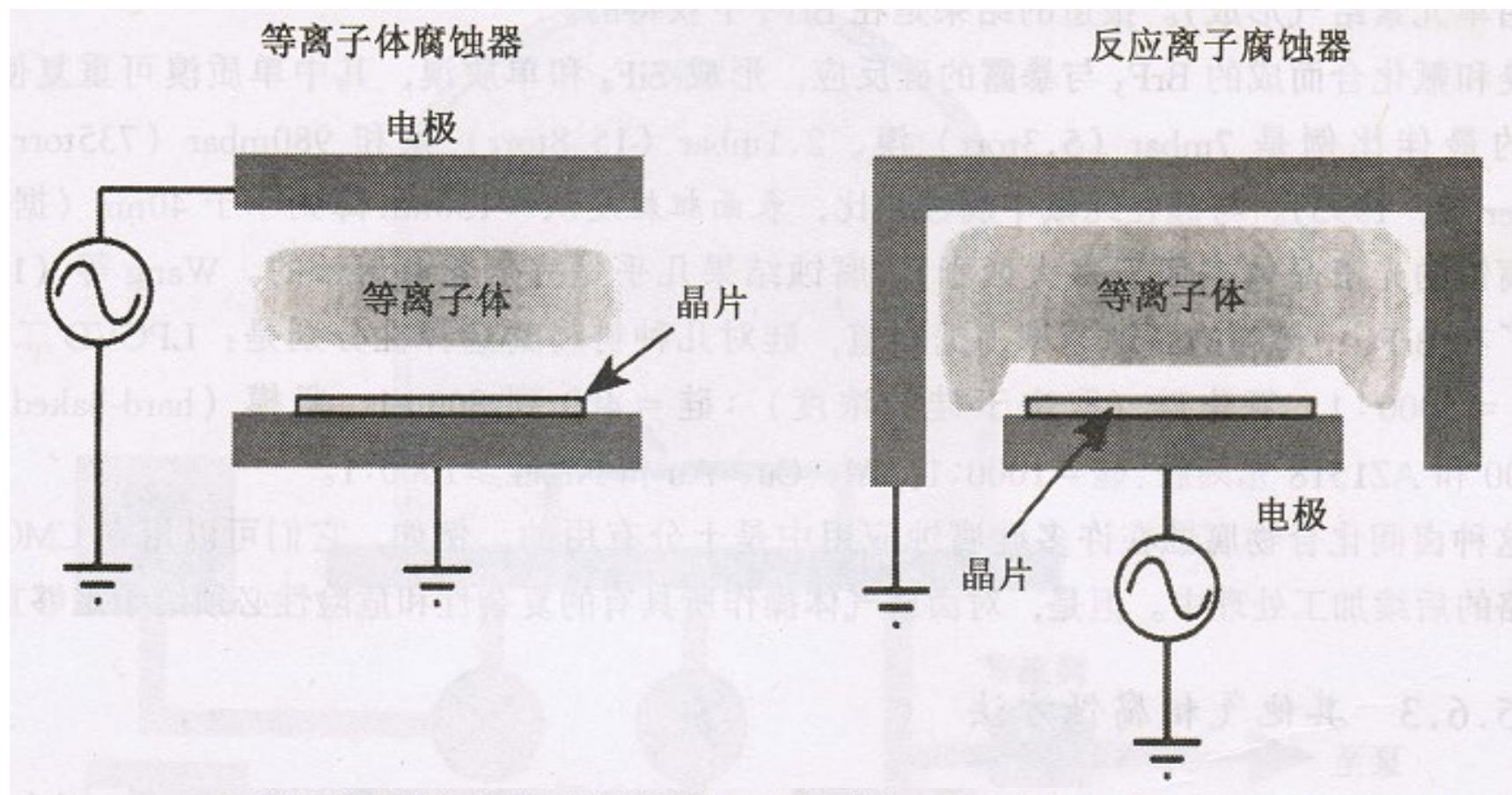
2、等离子体腐蚀技术

1) 溅射腐蚀和离子束铣蚀；具有高的分辨率，但选择性不够好，属物理反应。

2) 等离子体腐蚀：—ECR等离子体刻蚀机

惰性气体（ CF_4 ）在高频或直流电场中受到激发并分解，然后





等离子体腐蚀器（左）（晶片接地，电极对称）和反应离子腐蚀器（右）（晶片加电，接地电极的表面积要比加电电极的大得多）。反应离子腐蚀器（RIE），具有以下特点：
1) 晶片位于加电电极之上，2) 电极不对称，3) 操作压力相对较低 (10^{-3} 到 10^{-1} torr)，而等离子体腐蚀为 10^{-1} 到 10^{+1} torr)，能产生垂直于表面的能量相对较高的离子



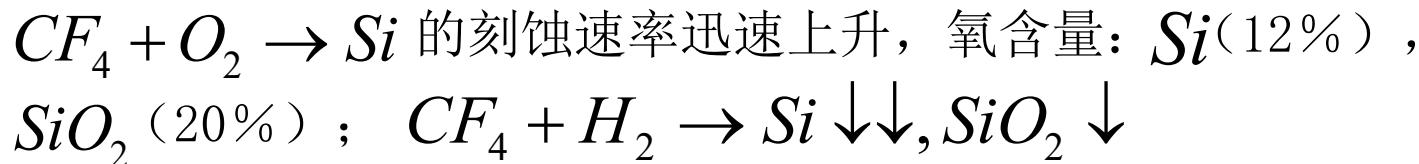


与被腐蚀材料起反应，形成挥发性物质（ SiF_4 ），再由抽气泵排出去，属物理/化学反应。

3) 反应离子腐蚀和反应离子束腐蚀，属化学反应，各向同性。只是用分子气体取代离子源中的惰性气体。

4) 影响腐蚀的因素

a) 气体的成分



C:F

$SiO_2 : Si$

CF_4 1:4

1:1

CHF_2 1:2

10:1

b) 其他因素

离子能量，入射角，气体的流速、压强，功率密度，频率，温度等。





3、 硅的直接激光加工

作用：对VLSI电路制造的各阶段中出现的差错进行局部修改

原理：利用强聚焦的激光束，促使表面进行化学反应（热激活反应、光化学反应）

4、 LIGA技术：光刻电铸成型

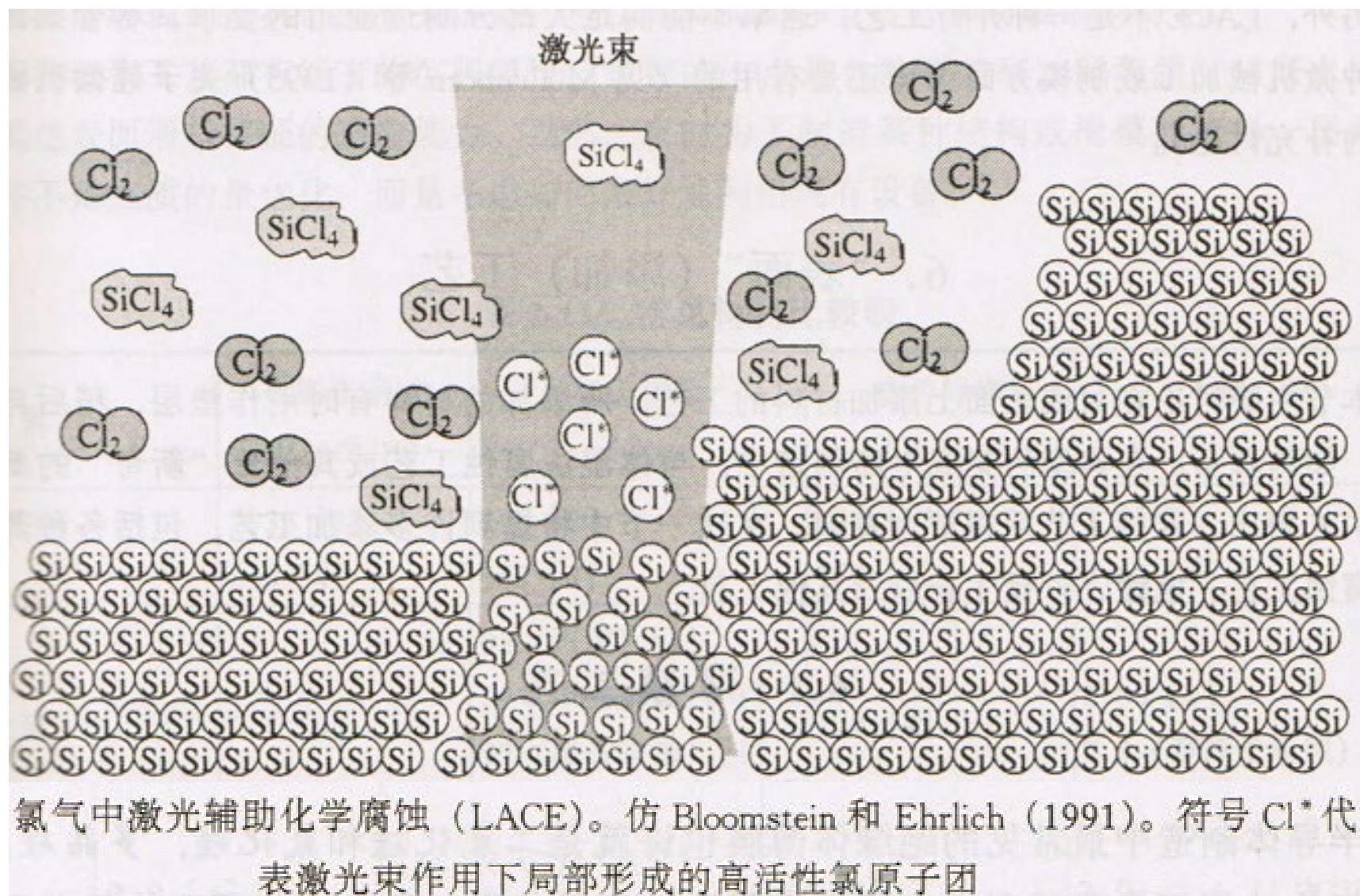
设备：使用由功率强大的同步辐射加速器所产生的软x射线源。

原理：使软x射线通过掩膜版，在导电的衬底上，将图形深深地刻在聚合物上，利用高能照射改变聚合物的腐蚀速率这一特性，将经照射后的聚合物，经过湿法腐蚀后在聚合物上留下了部件的主体模型。再用电镀工艺将金属淀积进入模型；将聚合物除去，就可得到最终部件。

§ 4.3.4 自致停技术

书中介绍的 P^+ 自致停腐蚀和P—N结自致停腐蚀以及埋层（SOI晶片）方法，属于通过控制掺杂浓度或控制硅的电位而达到自致停腐蚀的目







的，下面介绍几种其它方法。

1、注入损伤自致停腐蚀

进行阳极腐蚀时，空穴参与腐蚀过程。通过低剂量离子注入在硅表面形成一层损伤层，其中空穴的寿命非常短，则腐蚀液遇到损伤层速率明显降低。腐蚀完成后，需将硅片退火，使损伤层得到恢复。

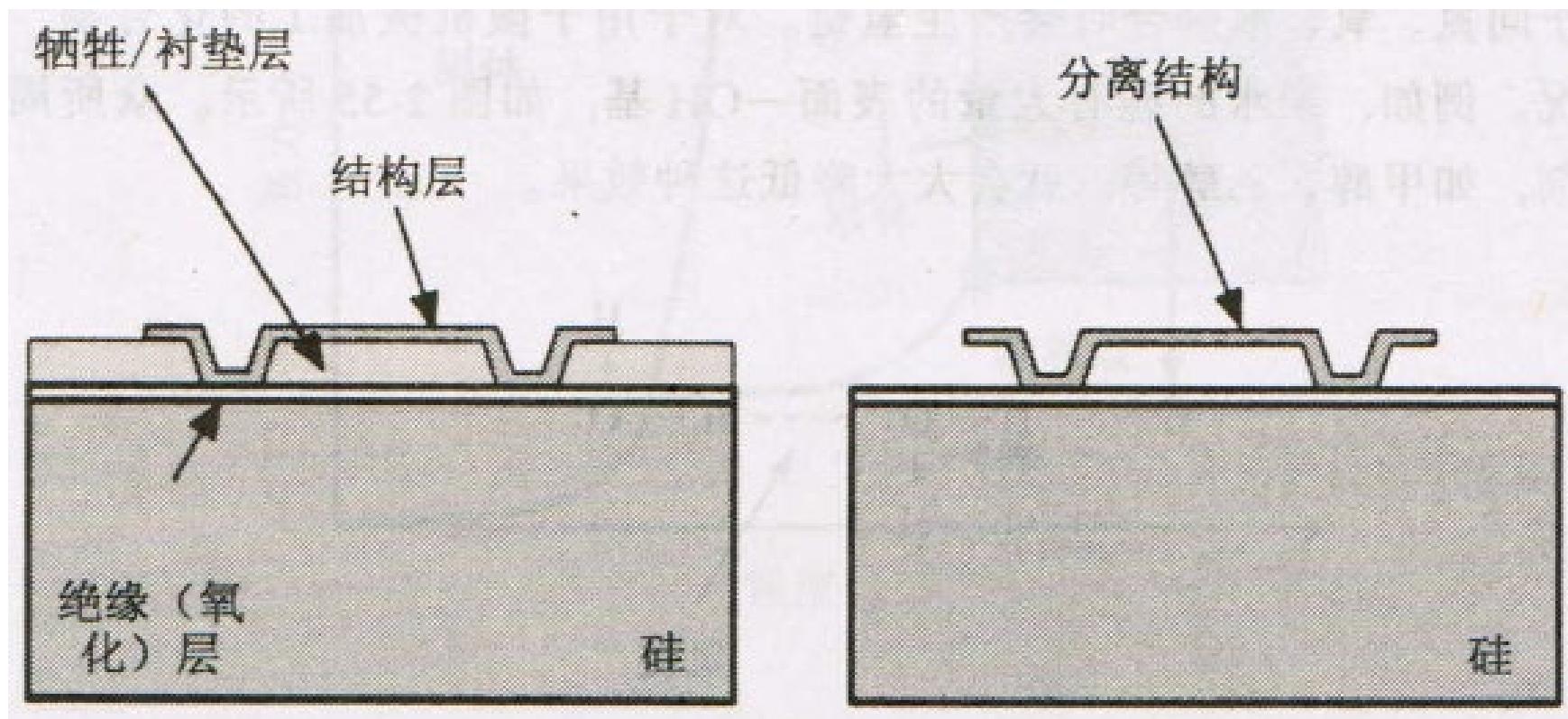
2、 $Si_{1-x}Ge_xSi$ 异质结构自致停腐蚀

利用分子束外延（MBE）或金属有机化学气相沉积技术获得 $Si_{1-x}Ge_xSi$ 的异质结构，然后对这些结构进行选择性腐蚀，如EDP、KOH腐蚀Si而不腐蚀 $Si_{1-x}Ge_x$ 。

§ 4.3.5 牺牲层技术

利用 SiO_2 作为牺牲层，采用选择性腐蚀技术，将两层薄膜中的下层薄膜腐蚀掉。





用牺牲层（如磷硅玻璃）形成的另一种材料（如多晶硅）构成的抬高和分离的微机械结构

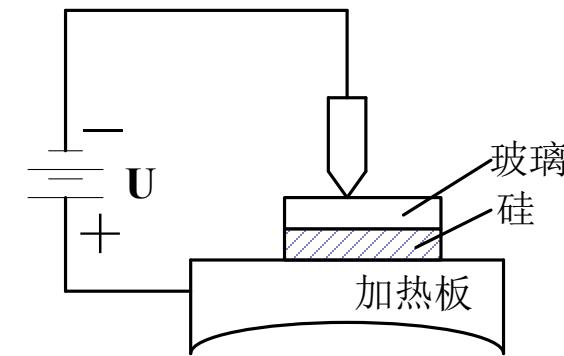
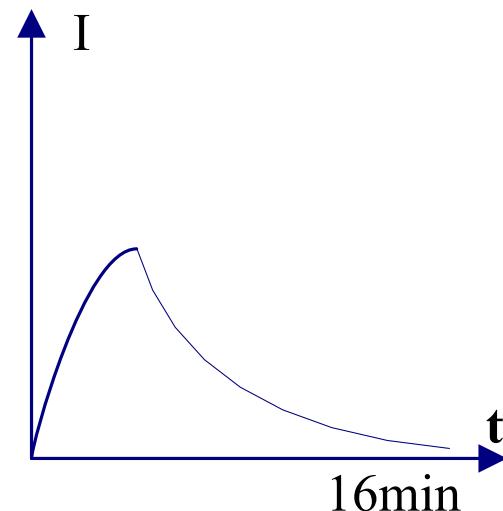




§ 4.3.6 键合技术

1、静电键合

1) 键合原理:



外加电压时，玻璃中的 Na^+ 向负极方向漂移，在紧邻硅片的玻璃表面形成耗尽层。由于耗尽层带负电荷，硅片带正电荷，所以硅片和玻璃之间存在较大的静电吸引力，使二者紧密接触。

当: $E = 3 \times 10^{-6} V/cm$ 时, $F \approx 24$ 大气压力。

温度的作用，使硅/玻璃界面发生化学反应，形成 $Si-O-Si$ 化学键。





2) 影响静电键合的因素

- a) 温度: $180\sim500^{\circ}\text{C}$ 低: 导电性差; 高: 软化。
- b) 电压: $200\sim1000\text{V}$ 低: 引力不够; 高: 击穿玻璃。
- c) 键合引入的应力: 选择热膨胀系数相同的材料; 选择合适的温度点, $T=300^{\circ}\text{C}$ 。
- d) 阳极形状的影响
采用双平行板电极会产生部分孔缝。

3) 应用

- a) 制作微传感器中传感器的封装;
- b) SOI材料的制备;
- c) 场发射阵列的制备。

2、热键合技术 (SDB)

两硅片通过高温处理直接键合在一起, 不需要粘合剂和外加电场。

1) 工艺步骤





- a) 表面处理;
- b) 预键合，在室温下将两硅片面对面贴合在一起;
- c) 键合。

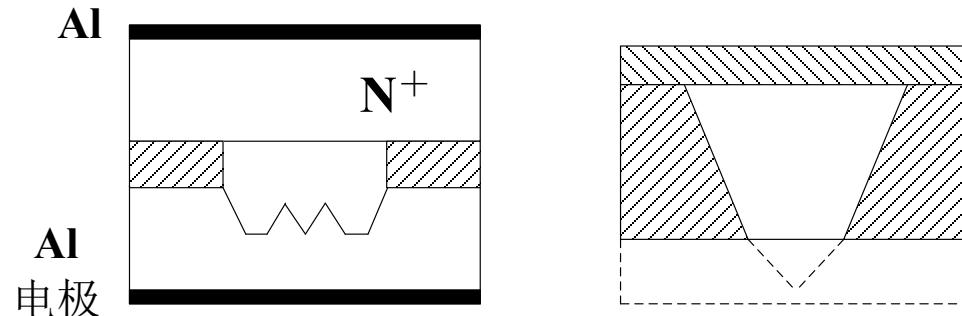
在 O_2 或 N_2 环境中经数小时的高温处理，书中给出了键合原理示意图。

2) 应用

适用于 $Si - Si$ ， $Si - SiO_2$ ， $SiO_2 - SiO_2$ 等。

- a) 电力电子器件，如双极模式MOSFET;
- b) SOI材料的制备;
- c) 传感器与微结构;
- d) 真空微电子器件。

自封闭真空微二极管：
(见右图)

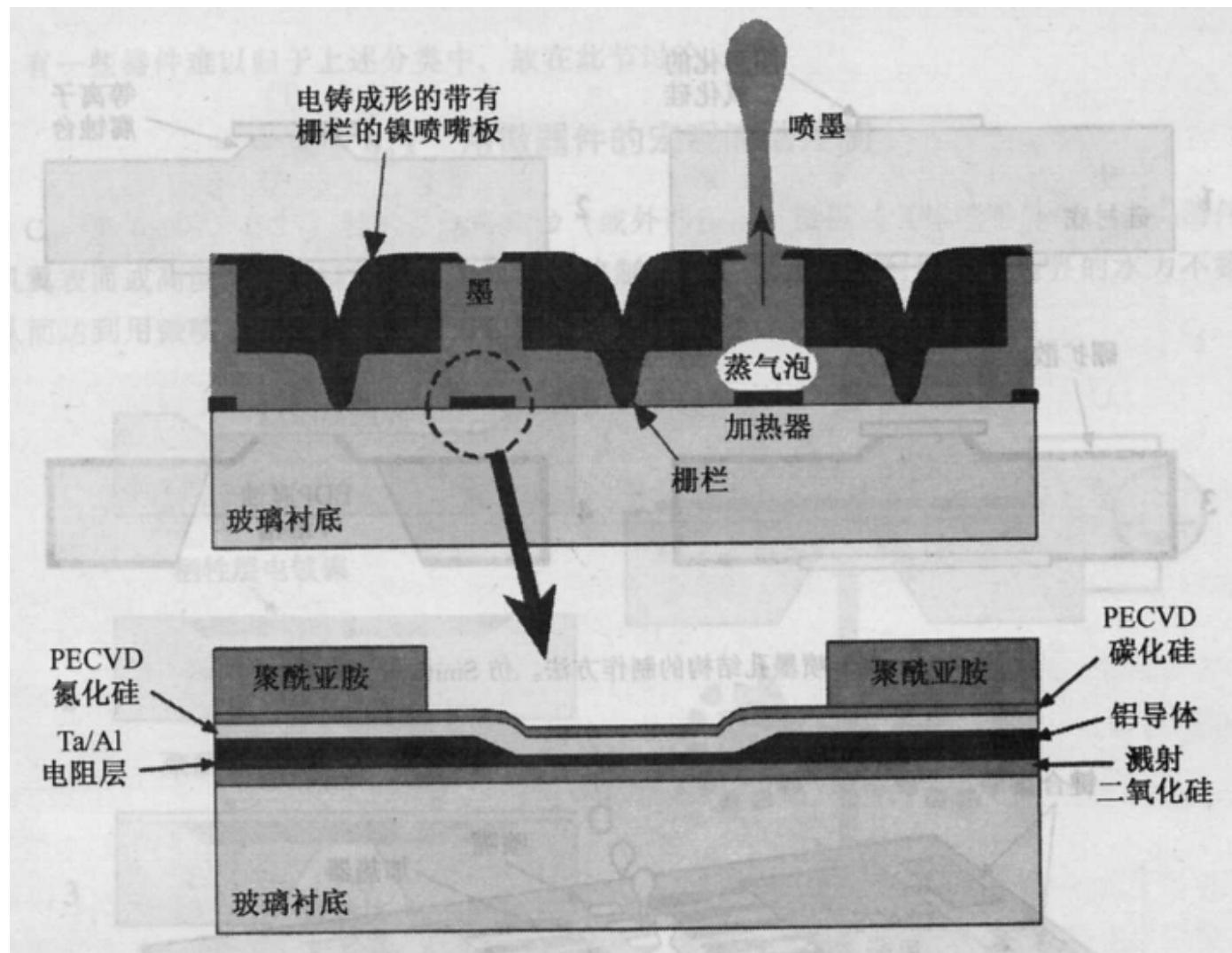




前面我们主要介绍了一些微机械加工技术，如：各向异性腐蚀、干法腐蚀、自致停技术以及键合技术等，在这里，我们结合微机械加工的基本技术，介绍典型的微机械结构及其加工过程。

为了开阔大家的眼界，这里罗列了一些采用微机械加工技术的多种器件，如：“喷墨嘴、微型光栅光谱仪、气相色谱仪、微型冷却器、触觉传感器、生物探针与生物传感器、陀螺仪、微型马达以及半导体压力传感器、硅加速度传感器等。”实际上这些器件的总的加工工艺都是大同小异，主要加工技术仍为：薄膜生成技术、刻蚀技术、键合技术。这里仅具体介绍硅微压阻式加速度传感器和同步马达。





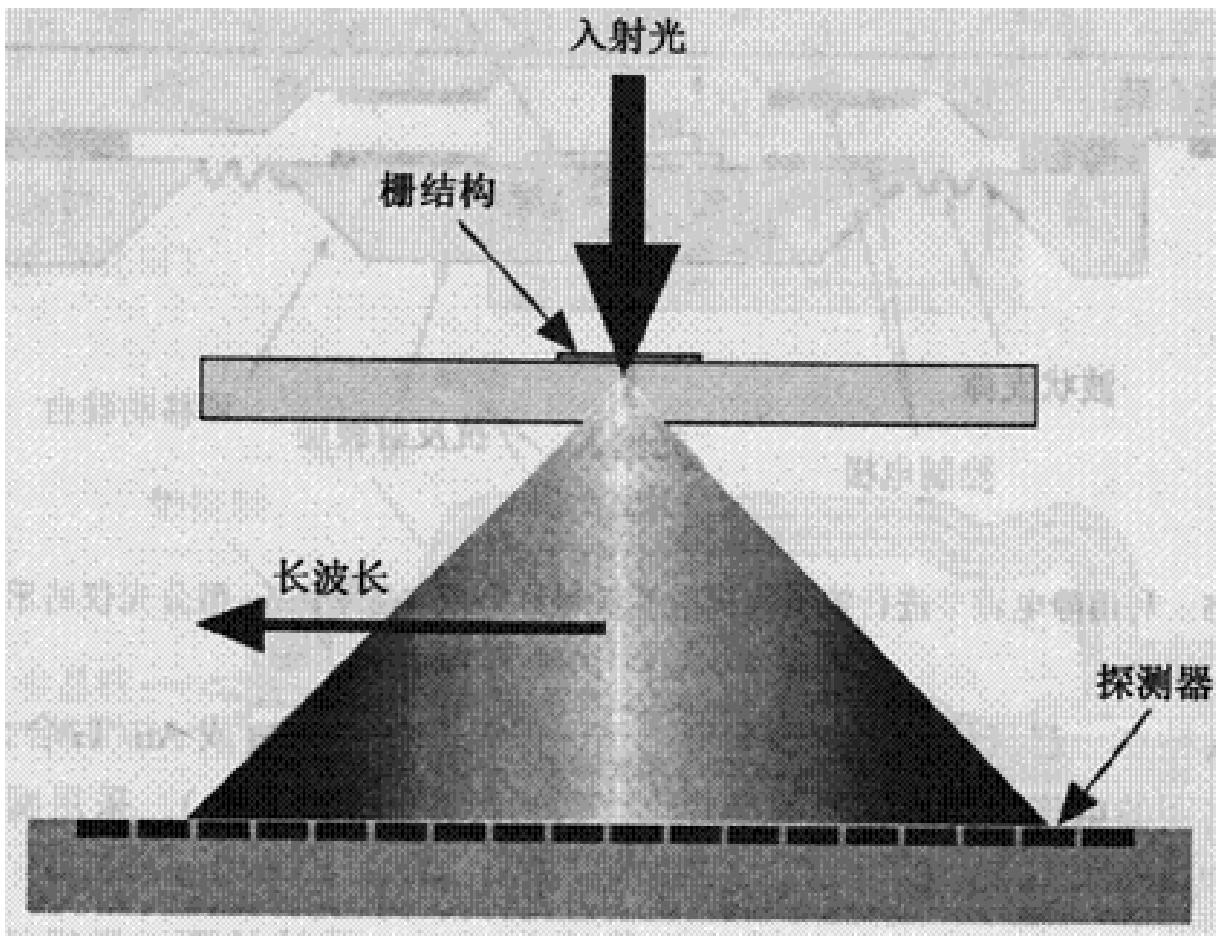
图中为键合的电铸成形镍喷嘴板和多层薄膜加热器

惠普喷墨器件图



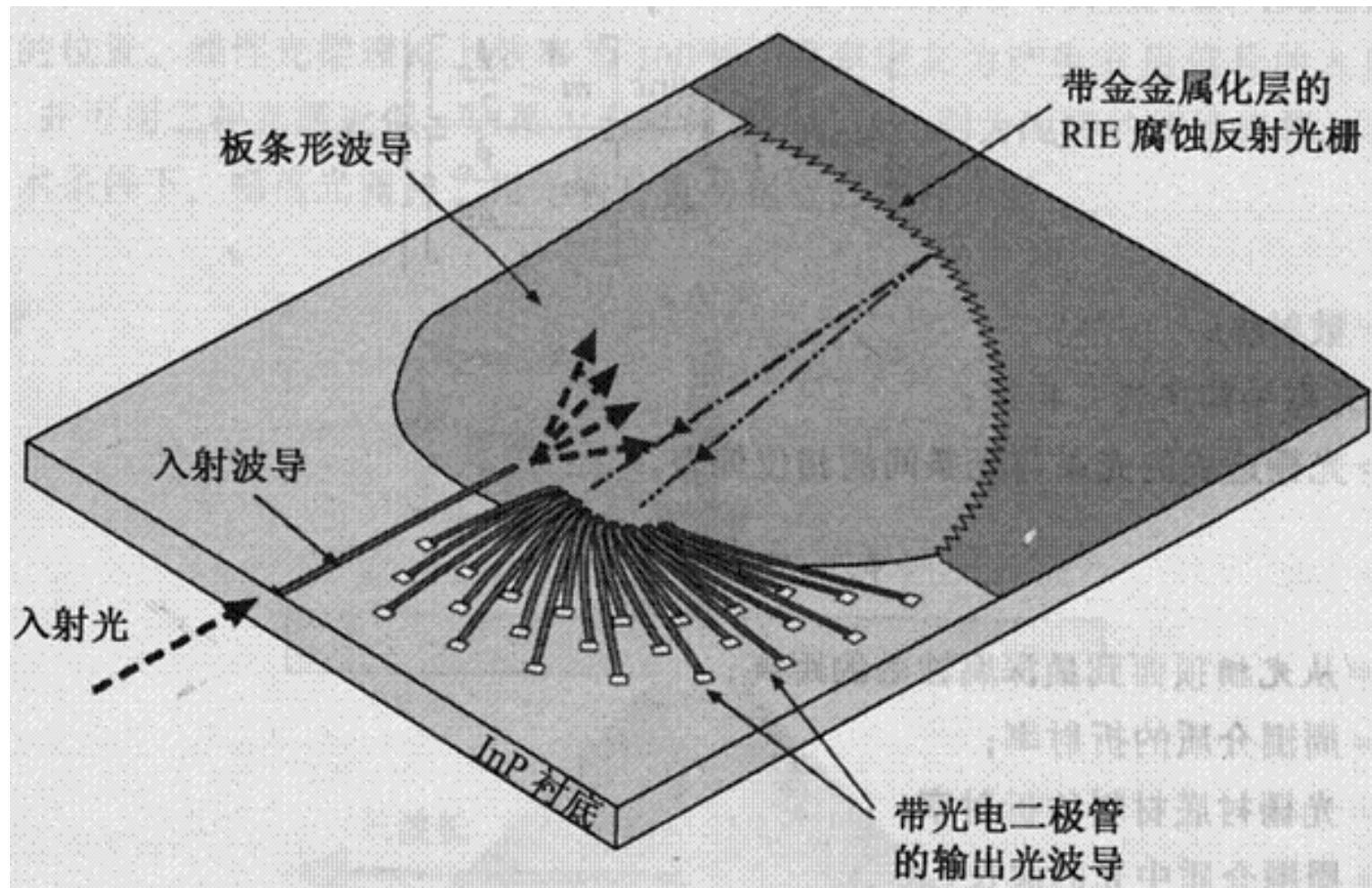


微型光栅光谱仪



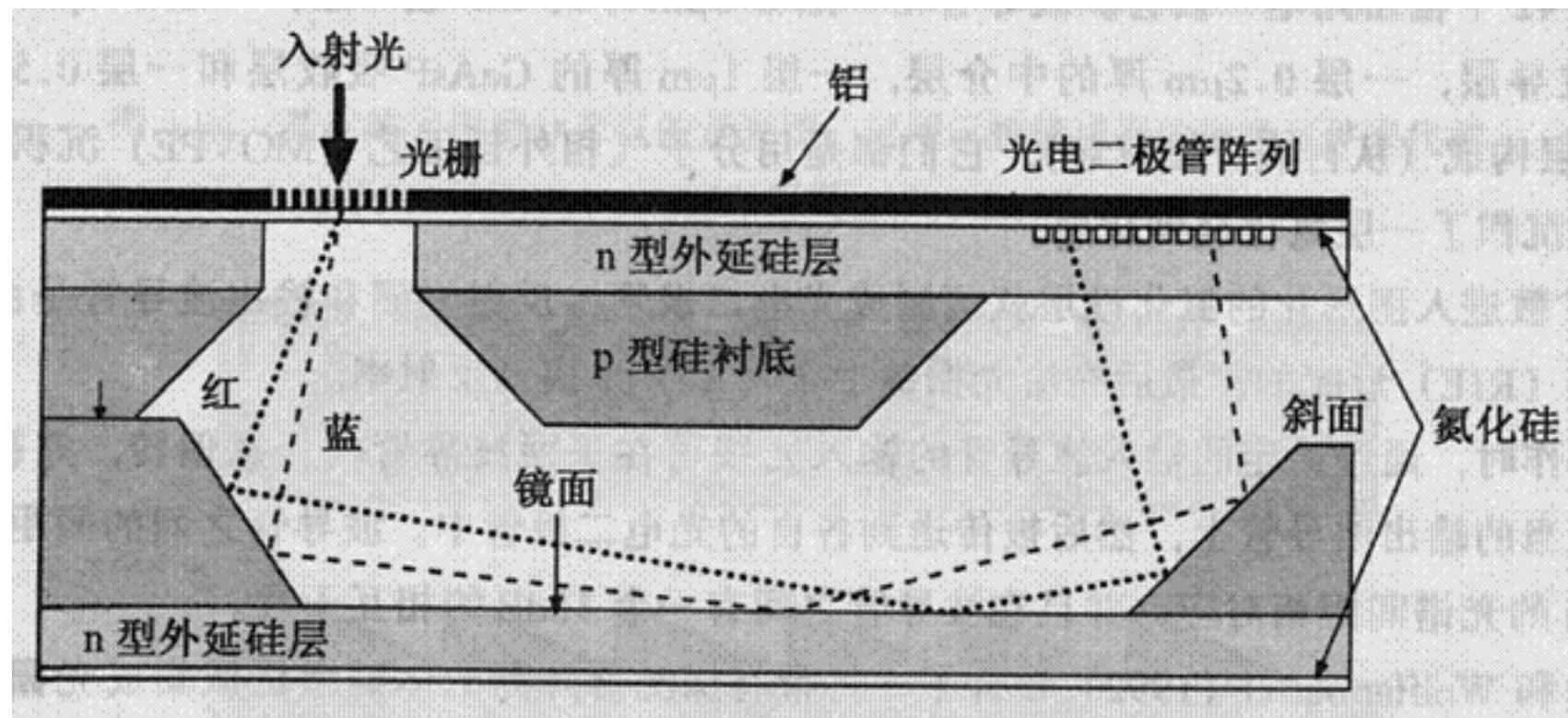
基本的光栅型分光仪的示意图。





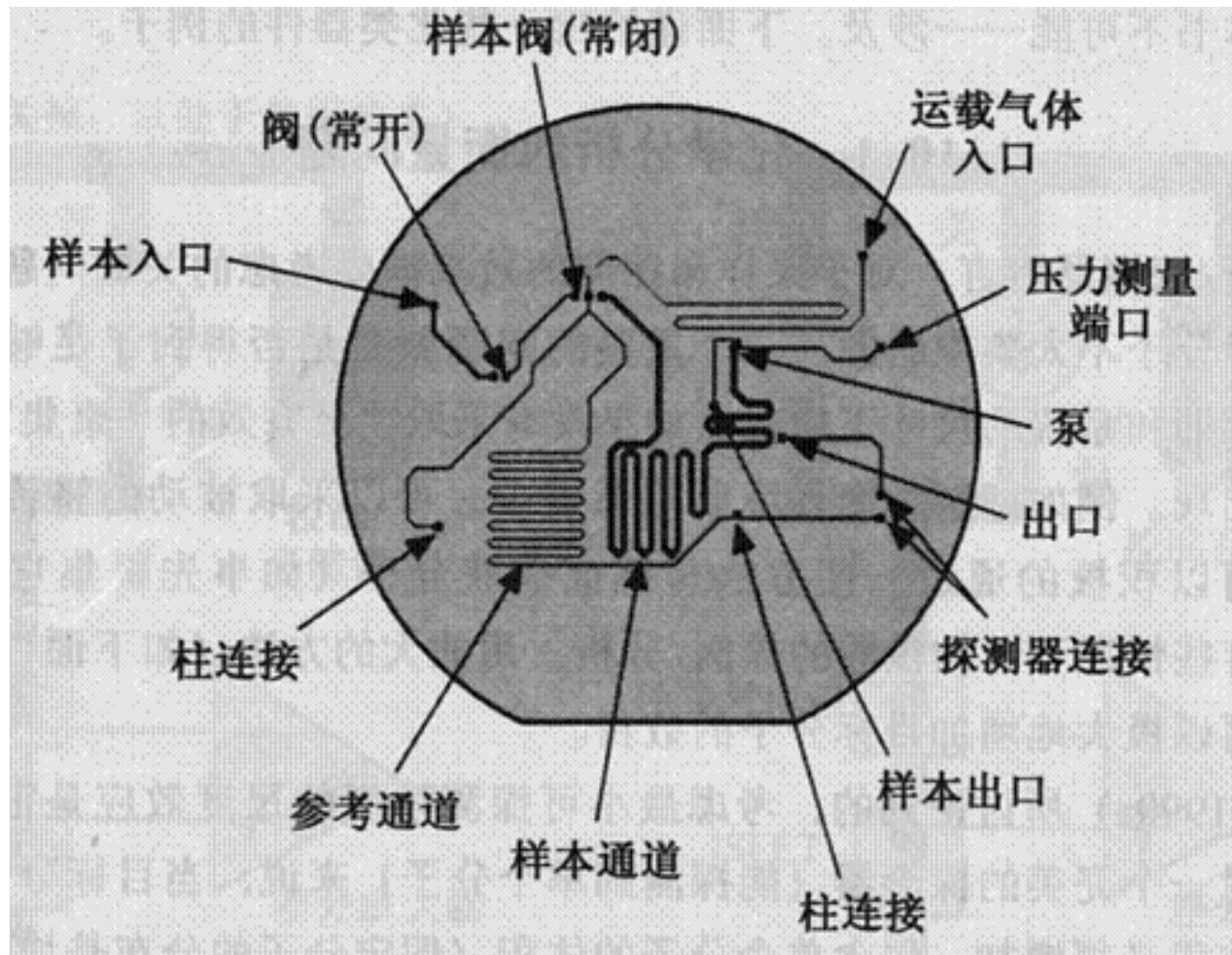
带有探测器的全集成 InGaAsP/InGaAs/InP 分光仪





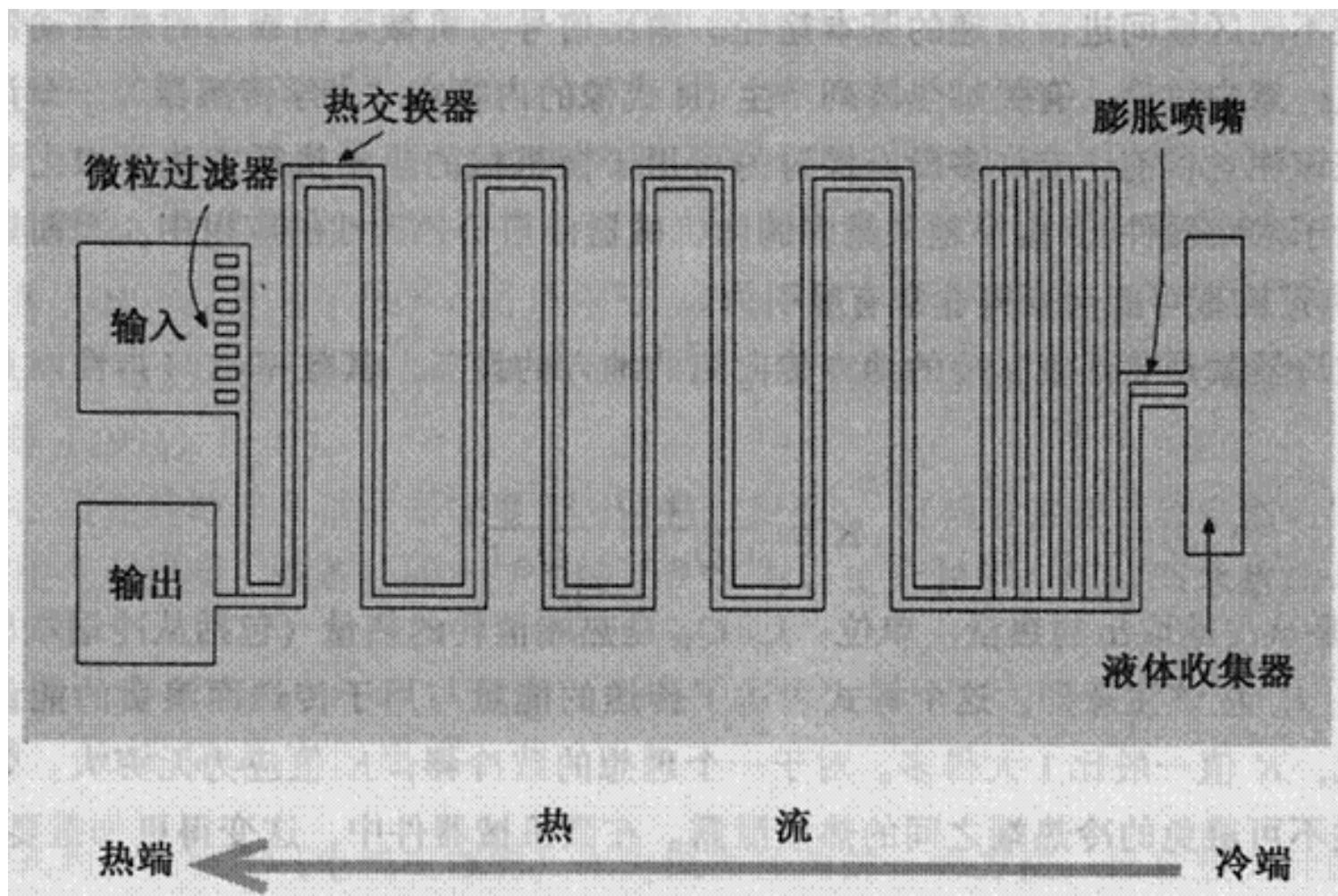
体微机械光栅分光仪的示意图





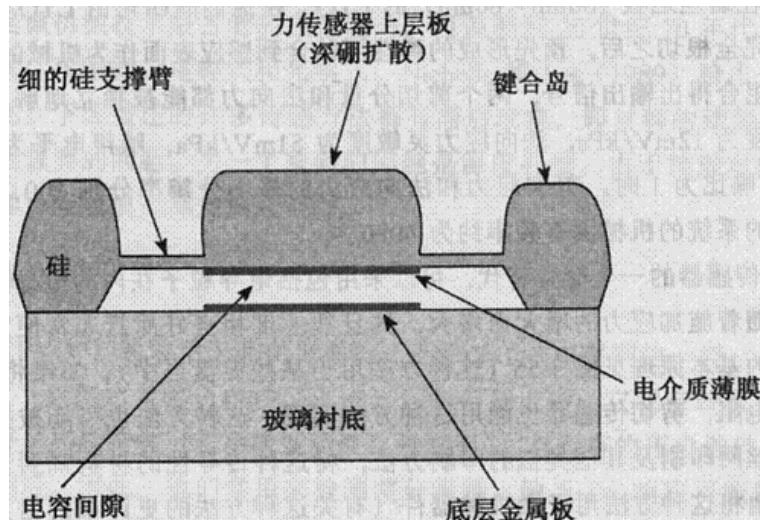
微机械气相色谱法系统



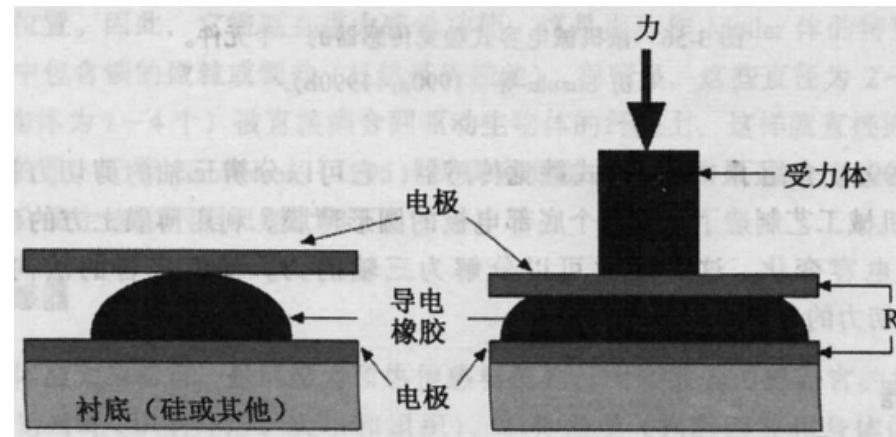


微机械 J-T 致冷器液体通道设计图

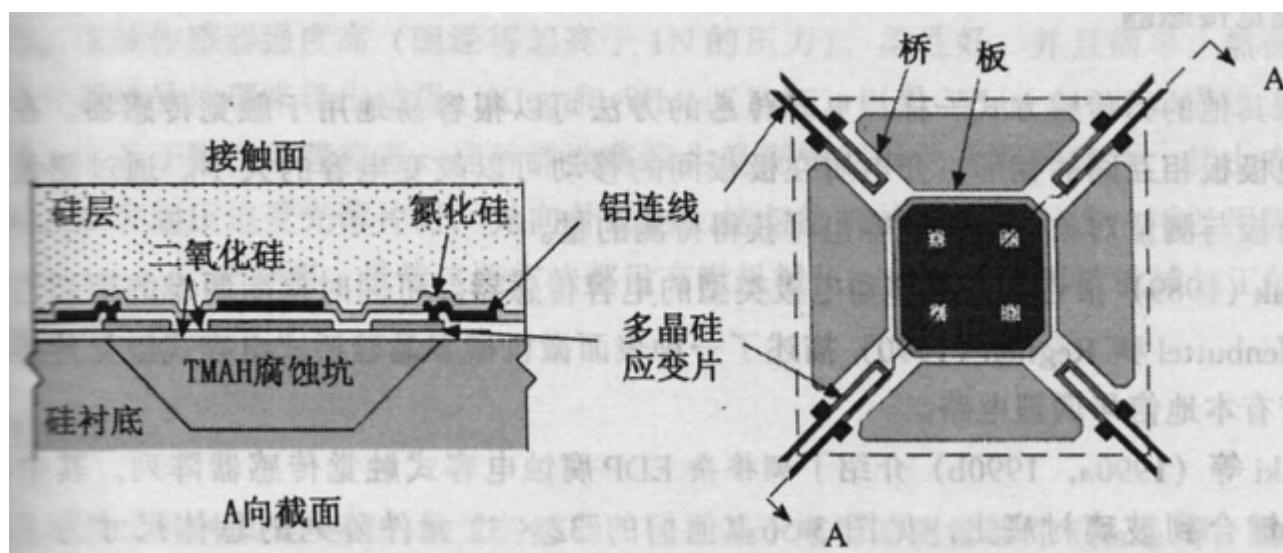




微机械电容式触觉传感器的一个元件



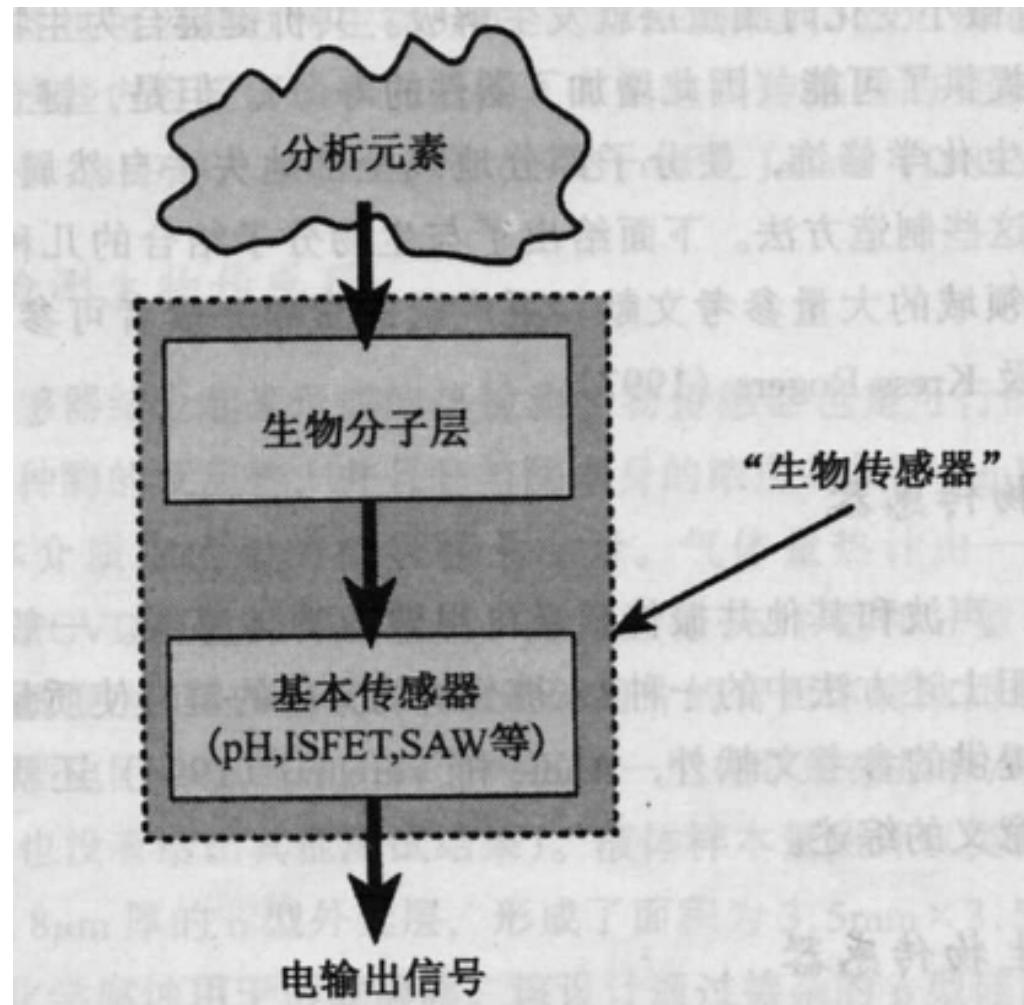
导电橡胶触觉传感器的基本概念图



微机械 CMOS 兼容的切向和法向力触觉传感器

几种不同形式的触觉传感器

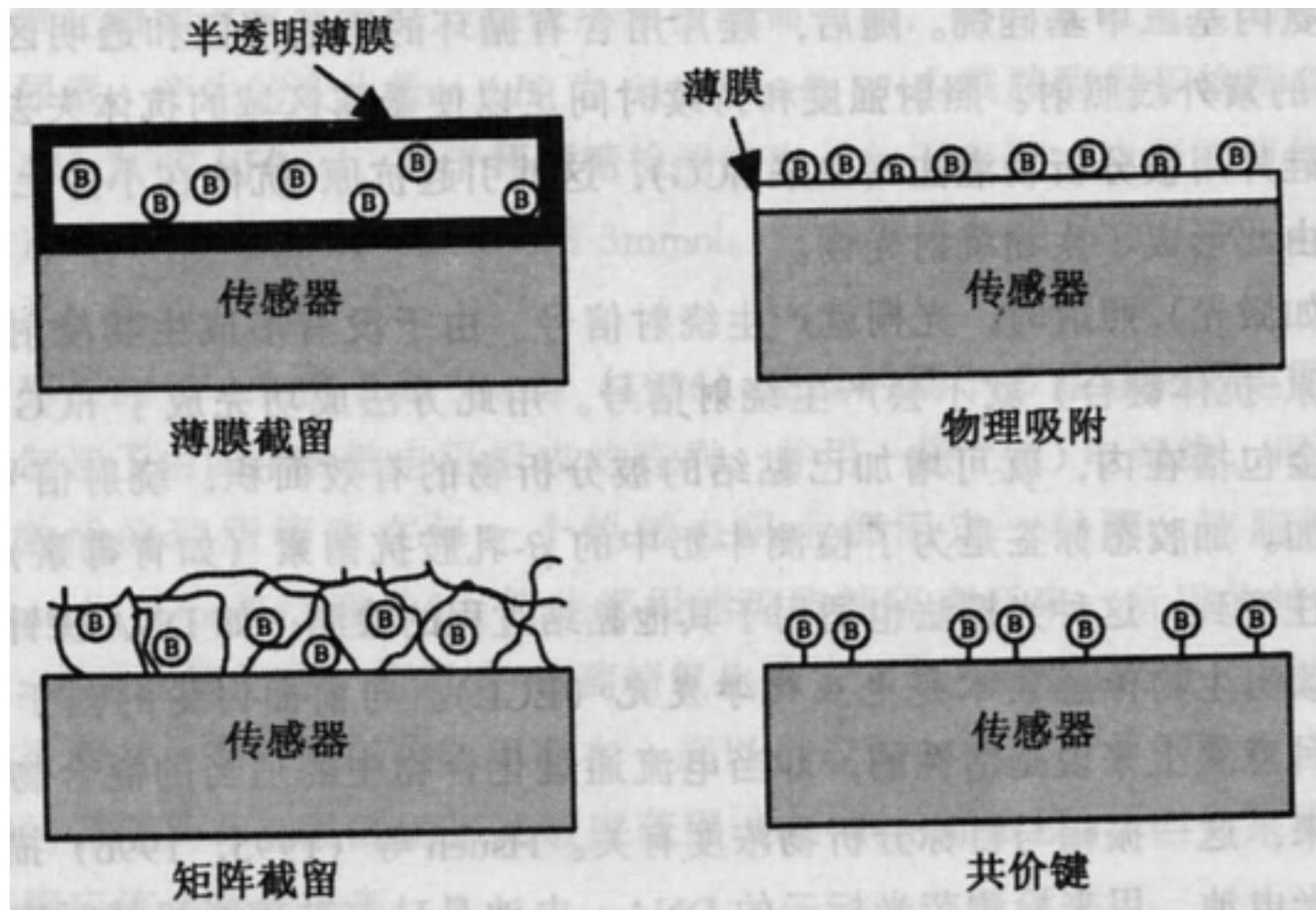




生物传感器的基本原理

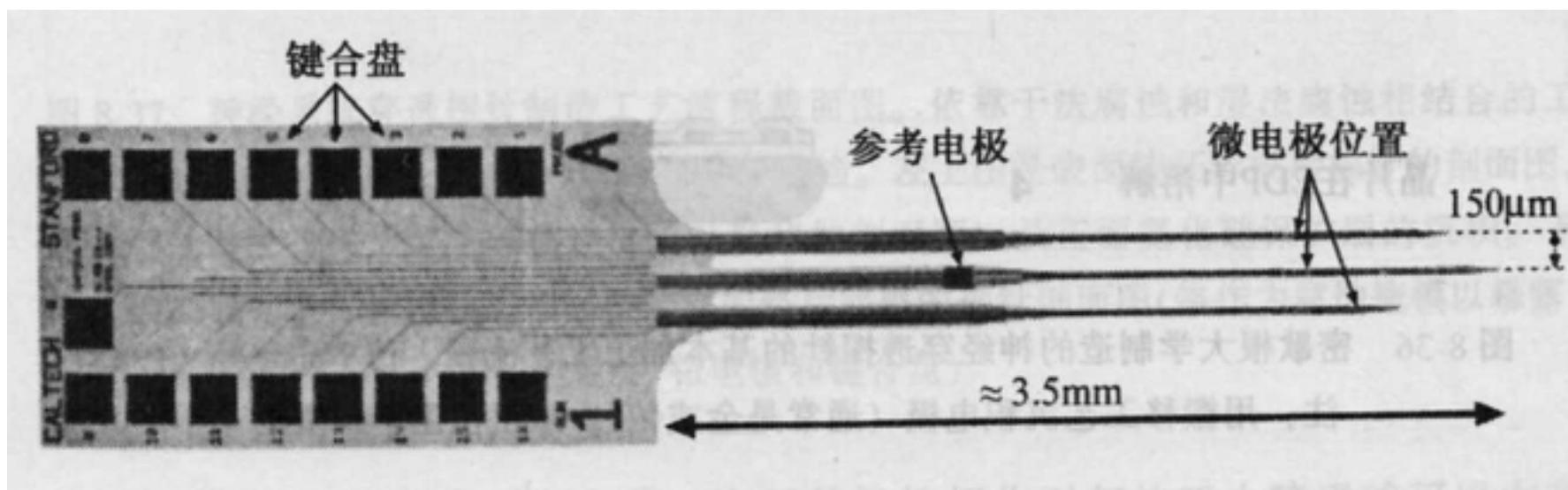
图中表示生物分子与提供输出电信号的二级传感器的结合





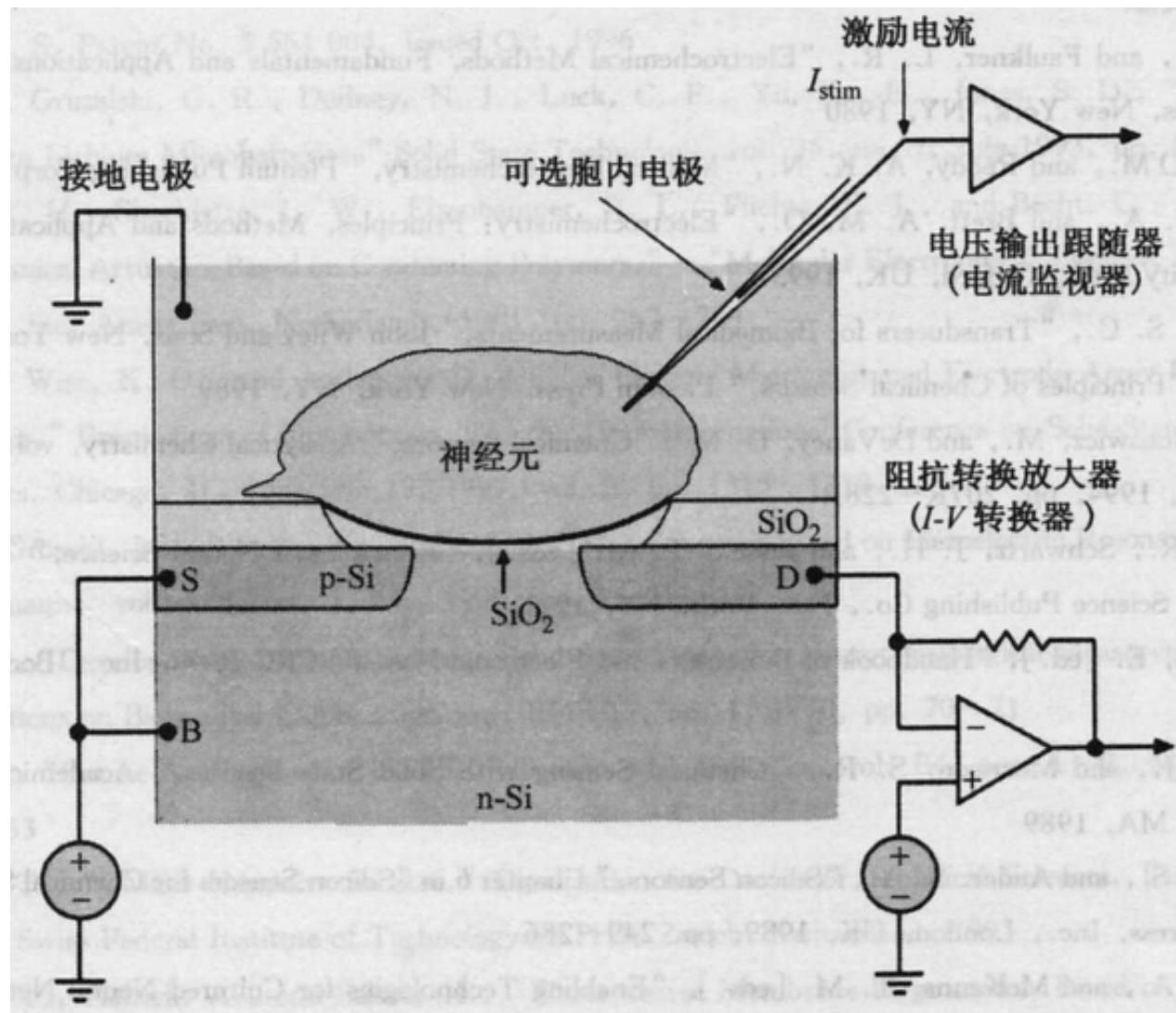
生物传感器中生物分子与基本传感器物理耦合的四种可能的模式。





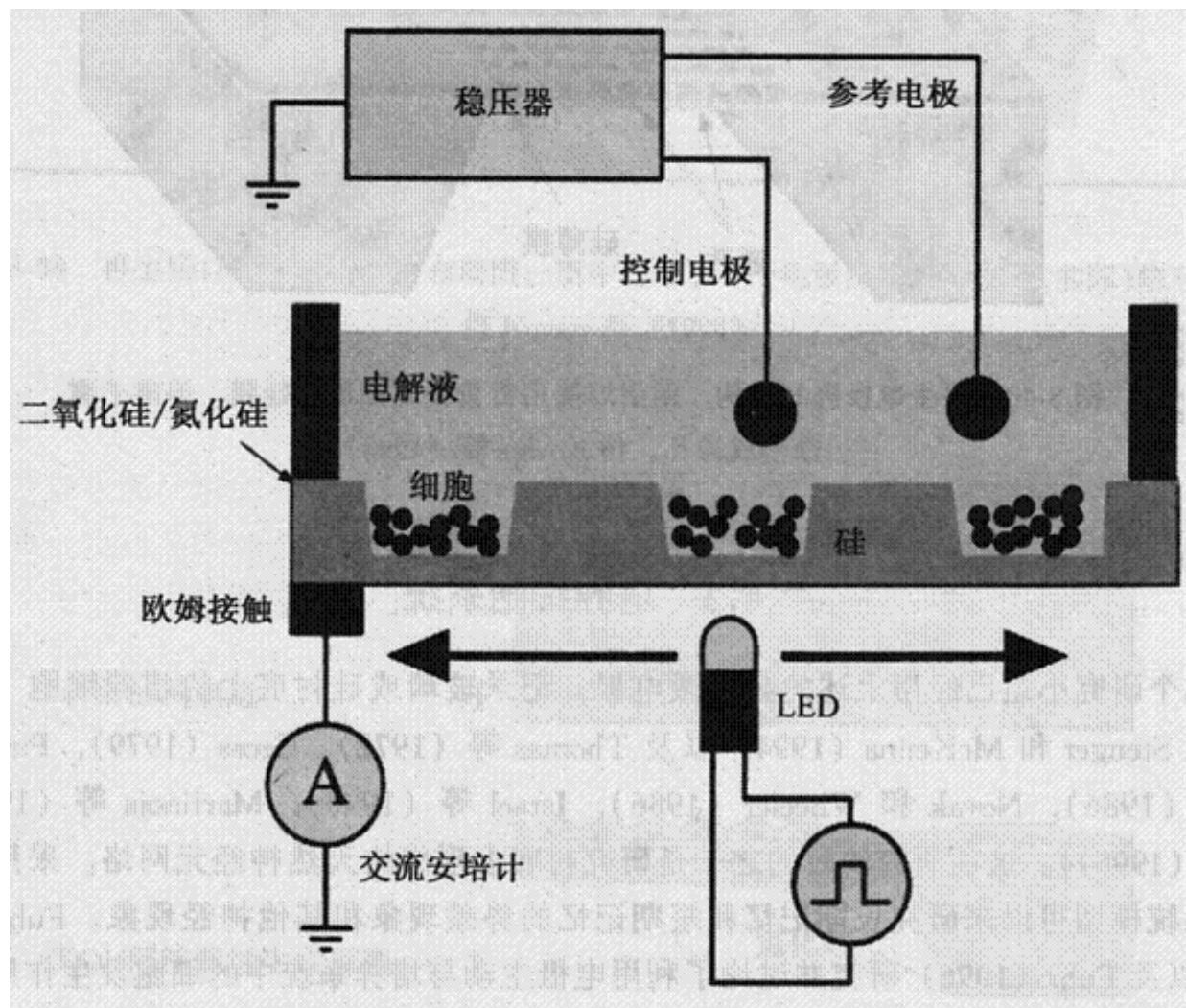
一种典型的神经系统穿透探针的俯视图





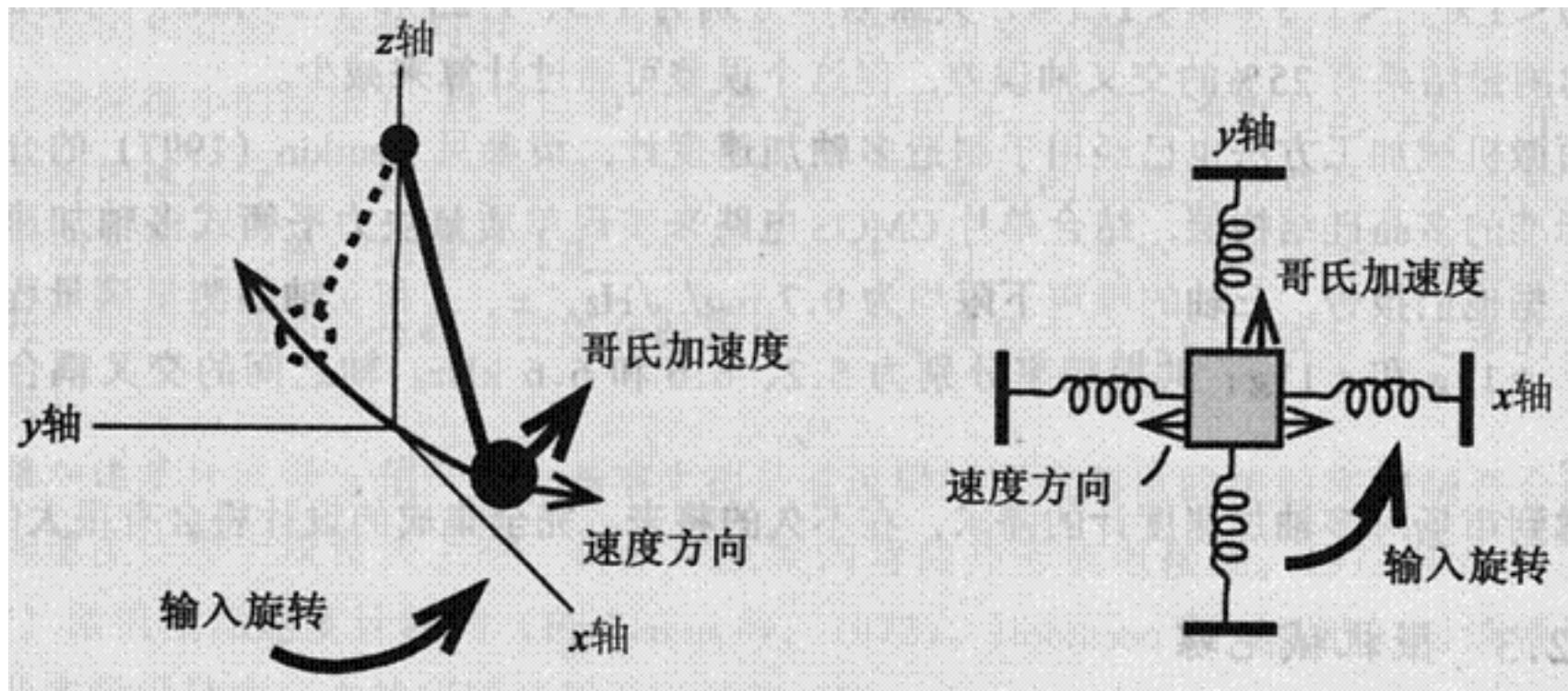
使用“开门”FET形成与神经元的直接电连接。





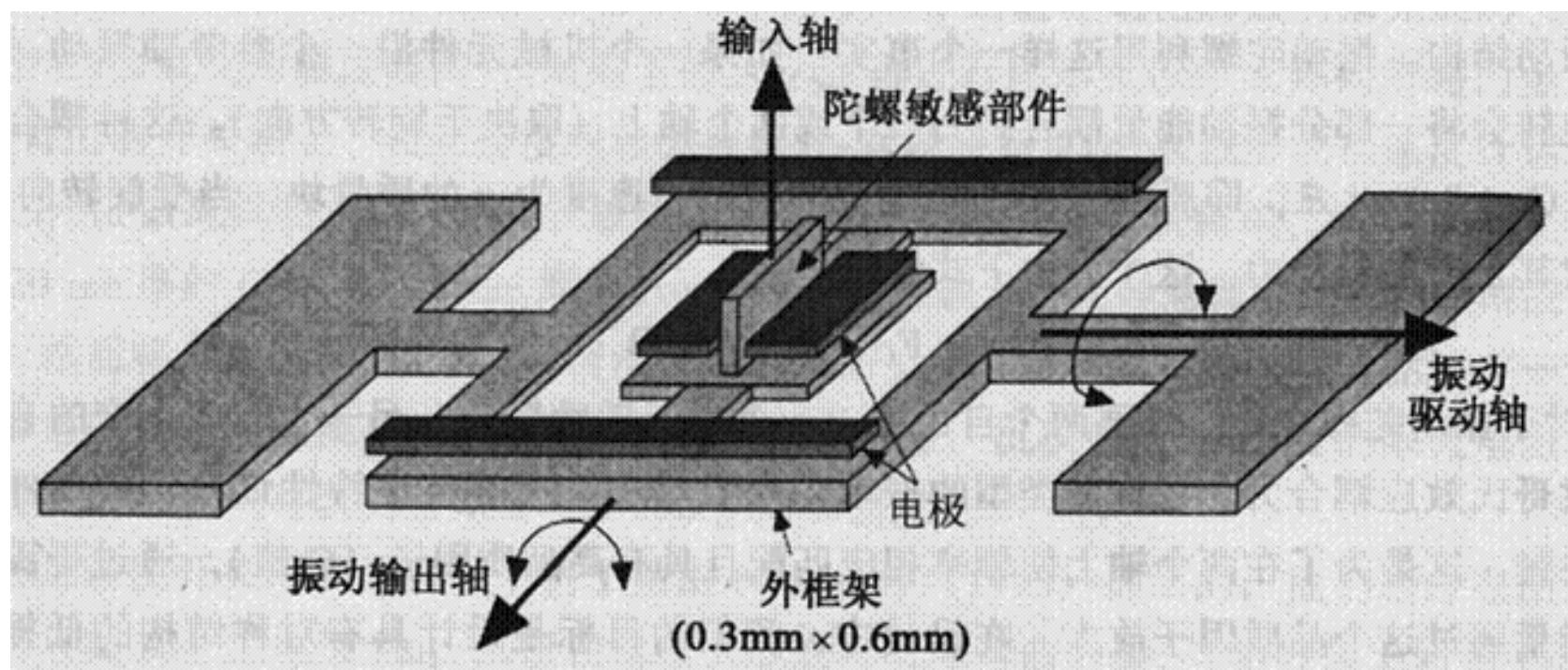
基于细胞外 pH 值测量的混合生物传感器系统





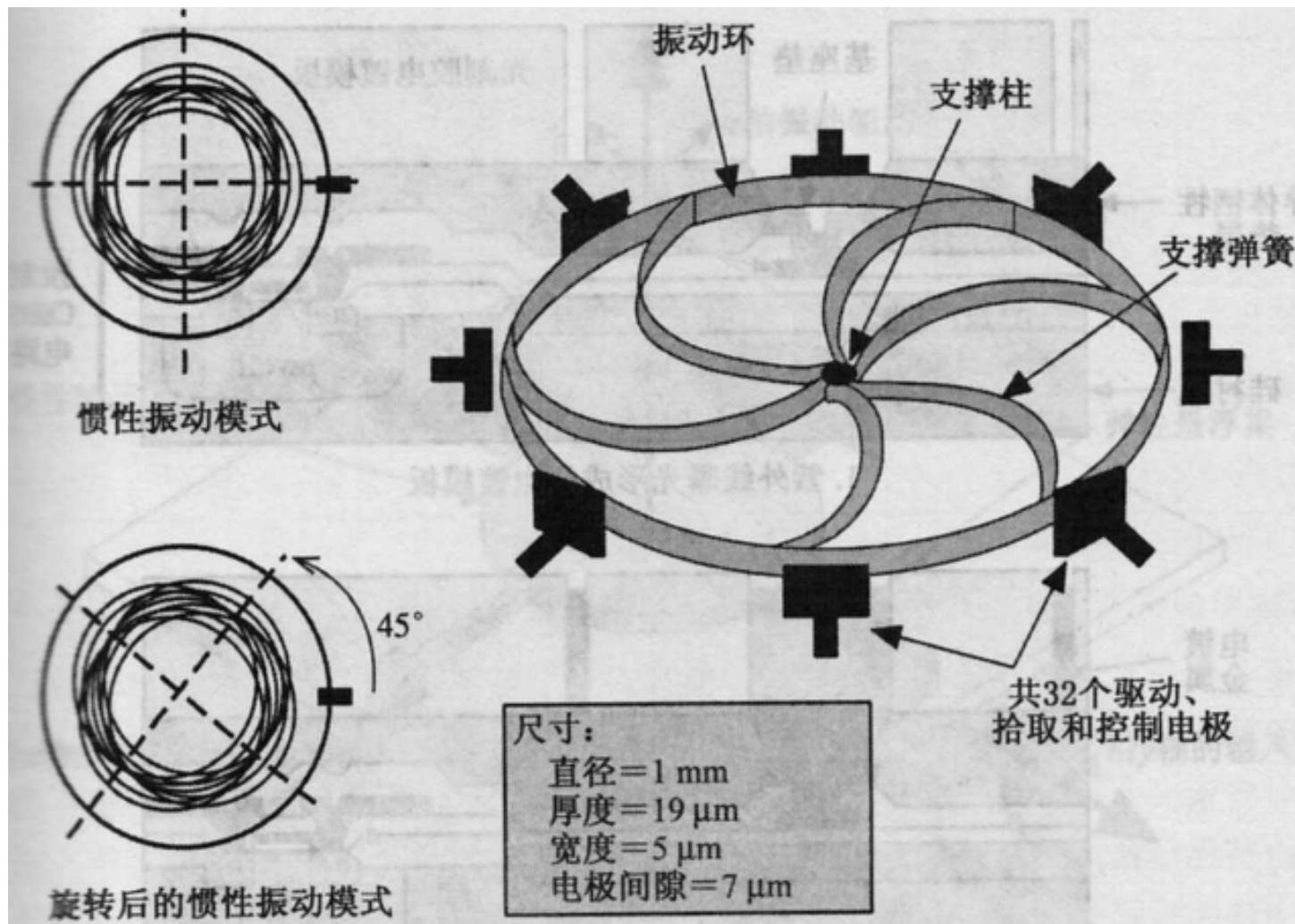
陀螺仪的基本工作原理和工作模式





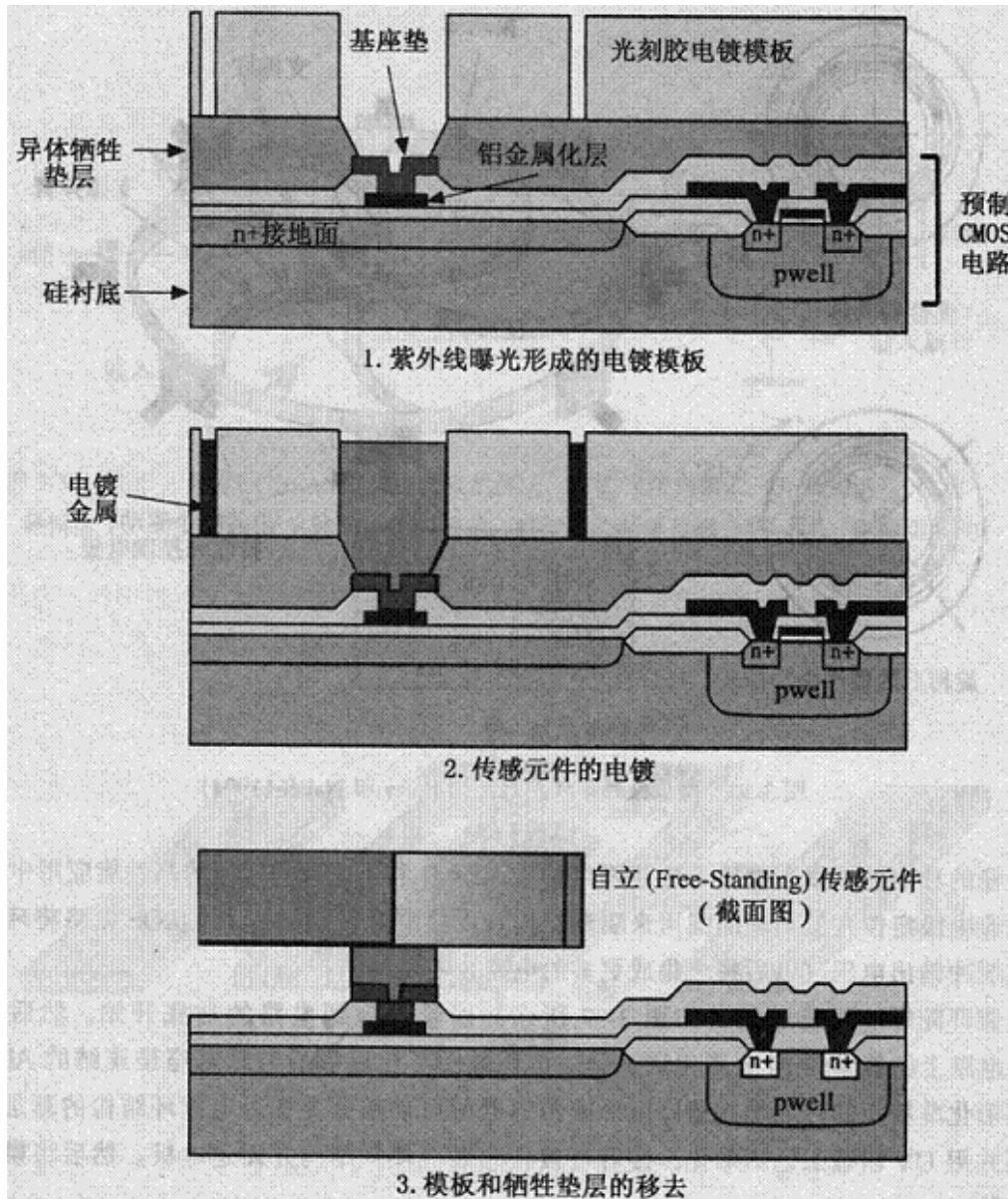
微机械力二次平衡陀螺





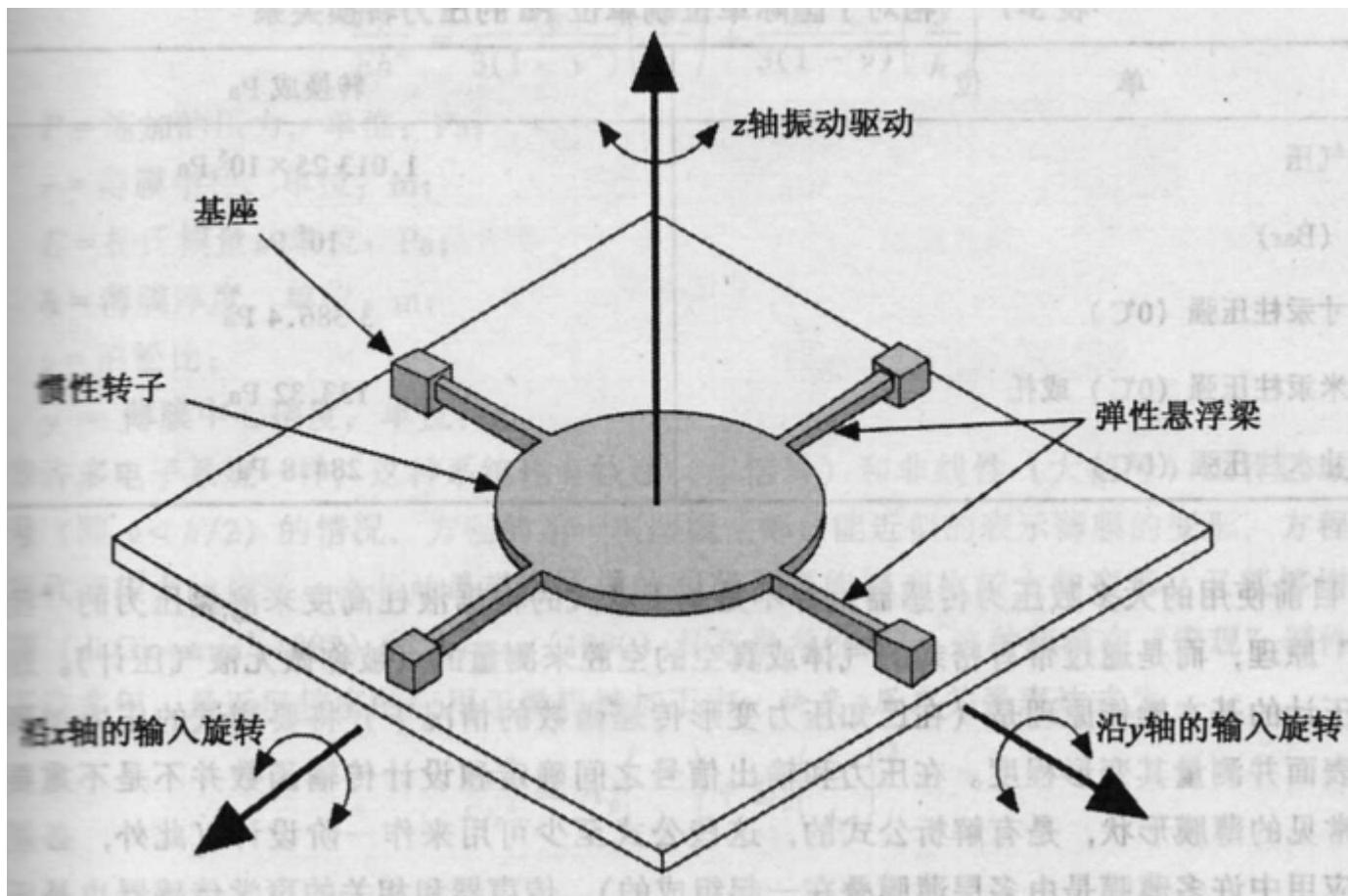
微机械共振环陀螺





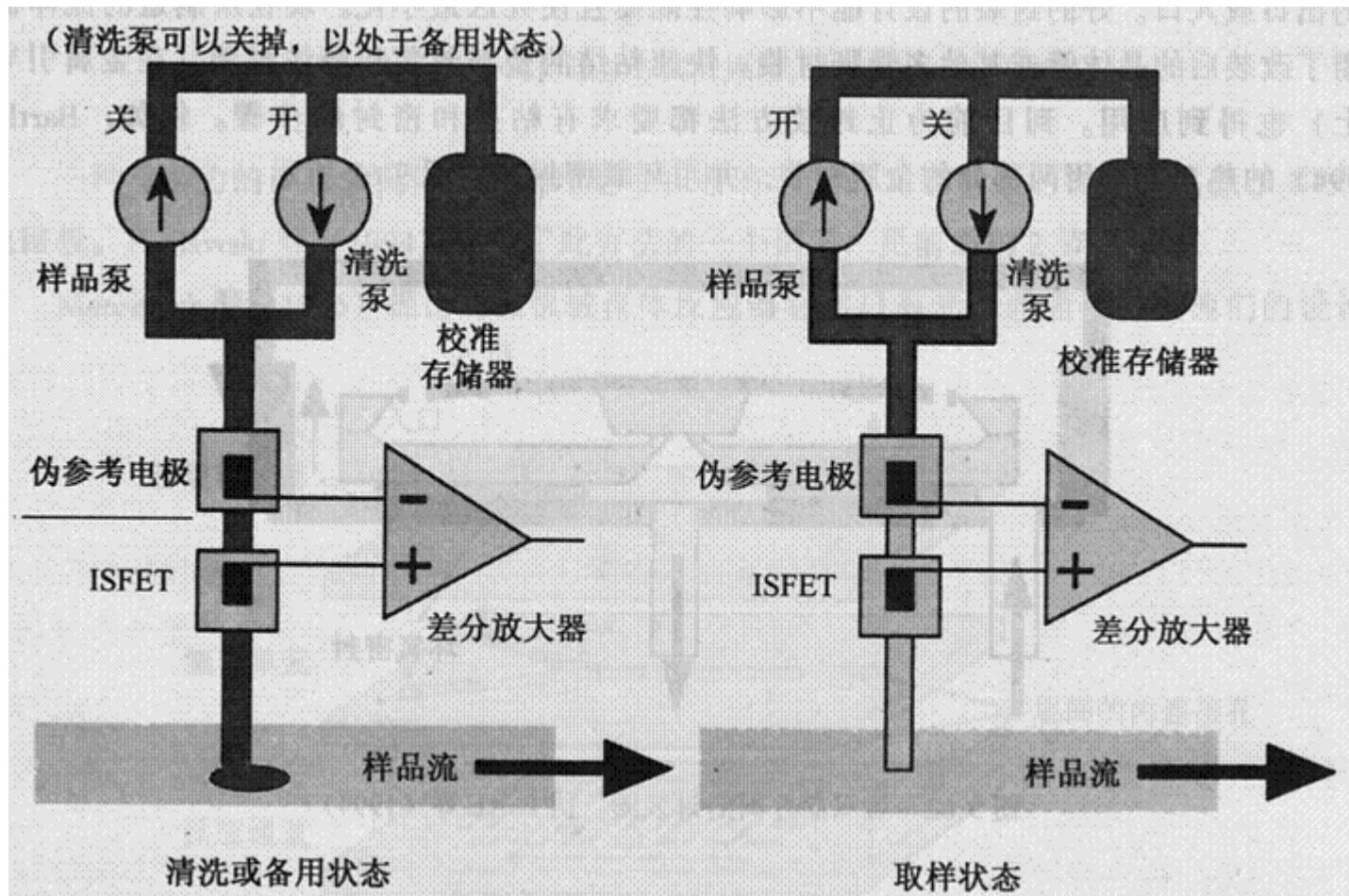
带有片上有源电路的电镀环陀螺的制造过程





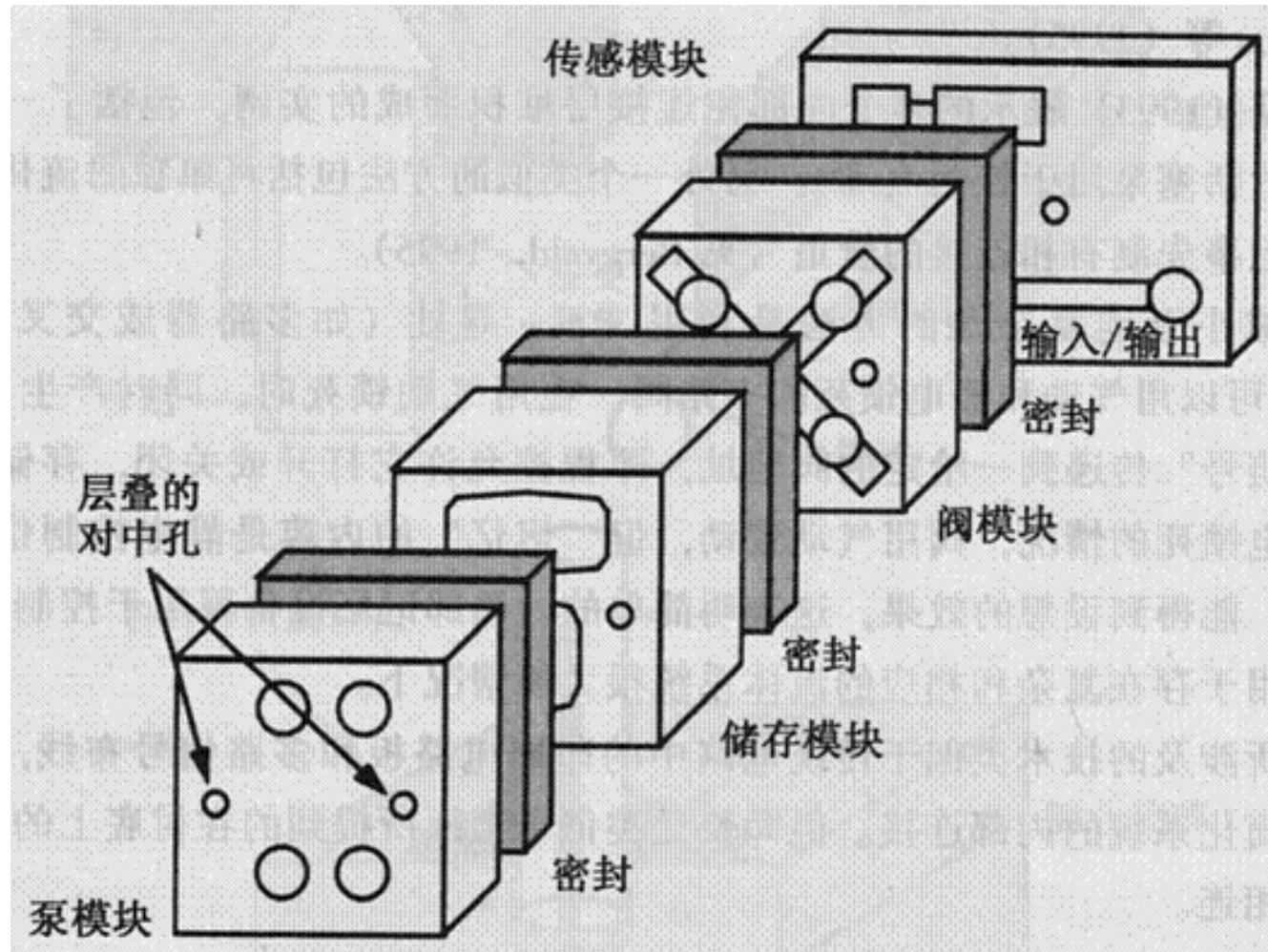
z 轴共振驱动的双轴微机械陀螺工作原理图





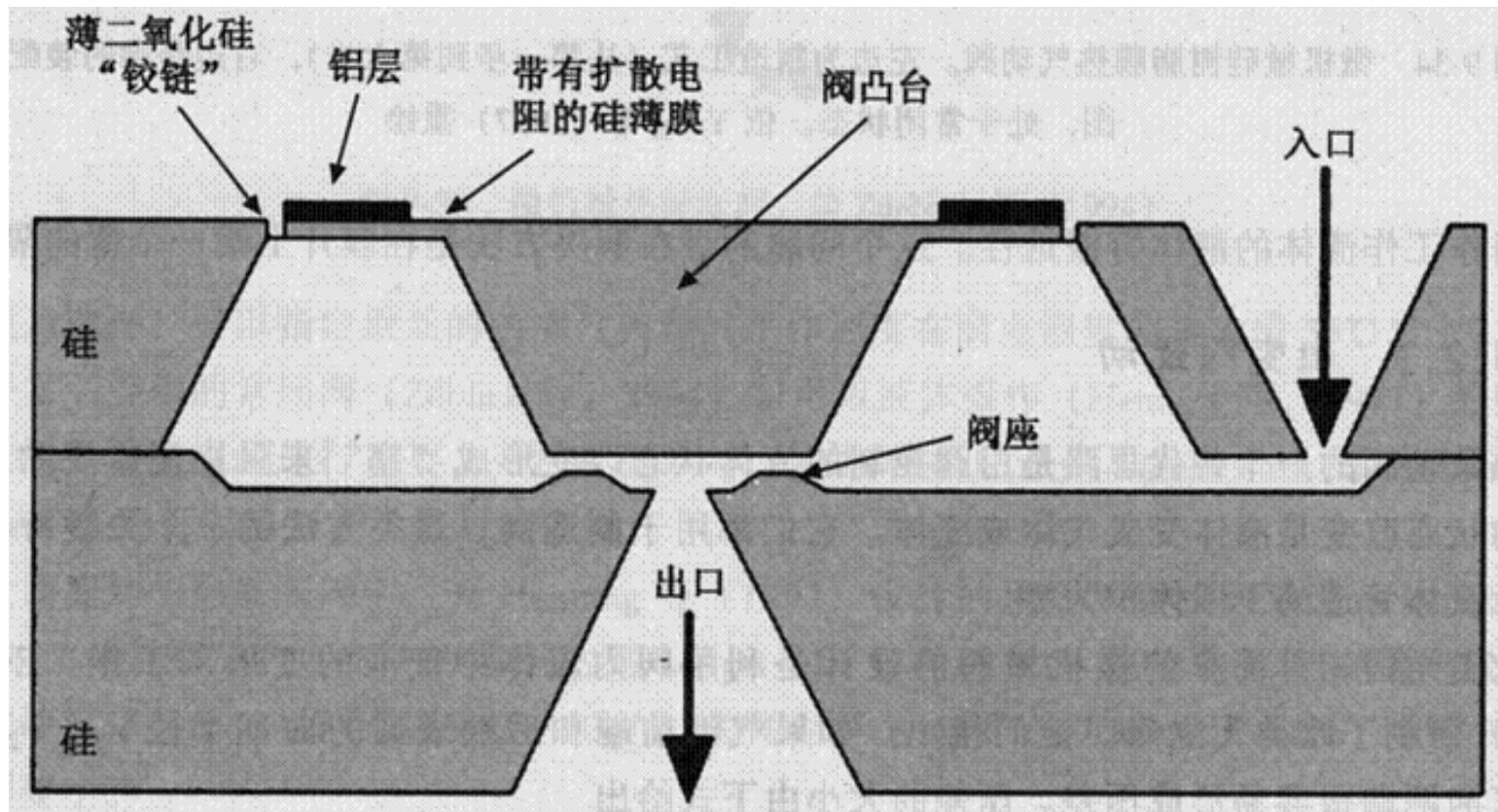
集成化学分析系统的清洗、校准、采样方案





堆积流体模块方案

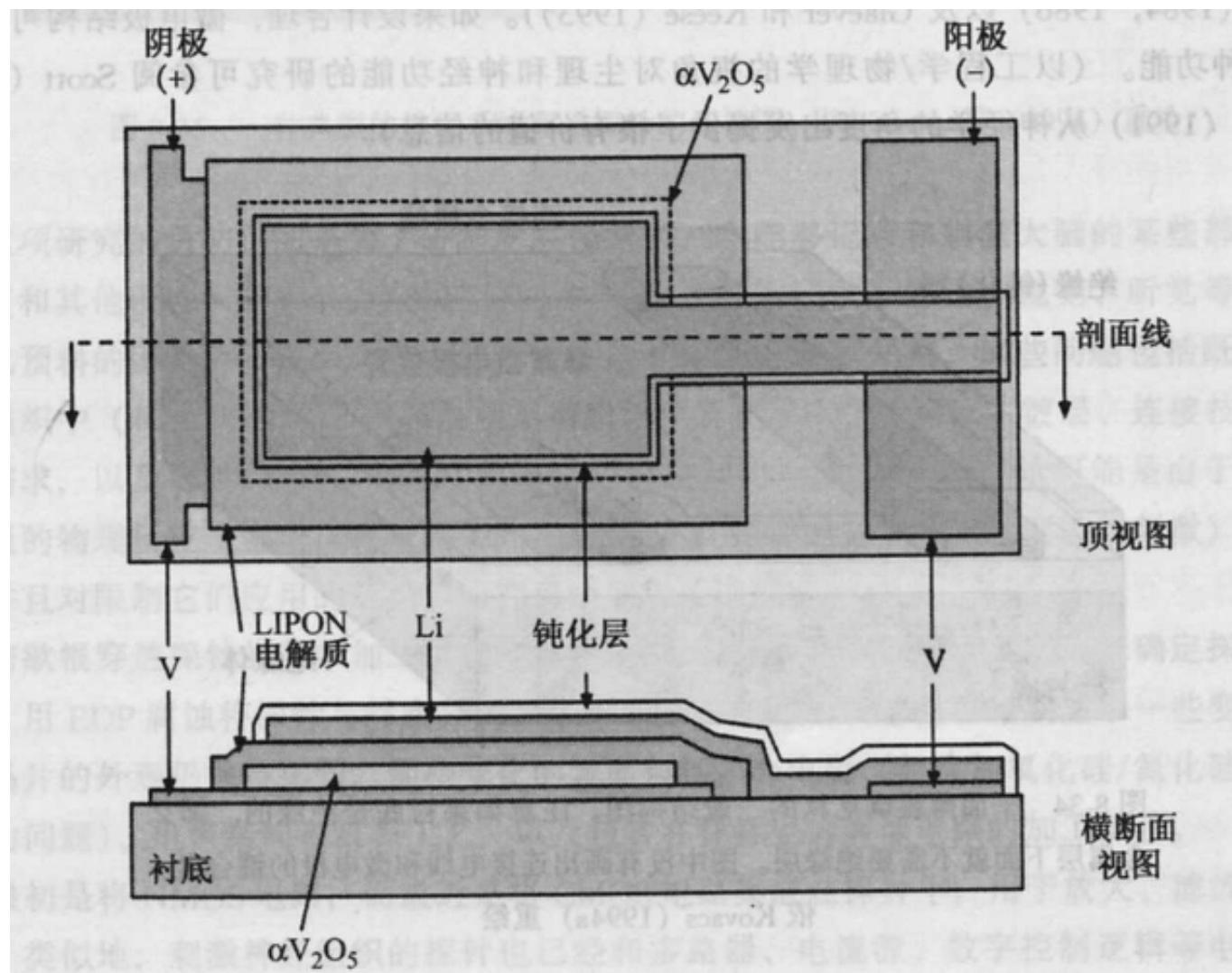




常闭气体阀双晶片结构和热双晶执行原理图

图中阀部分开启





薄膜锂电池的结构图

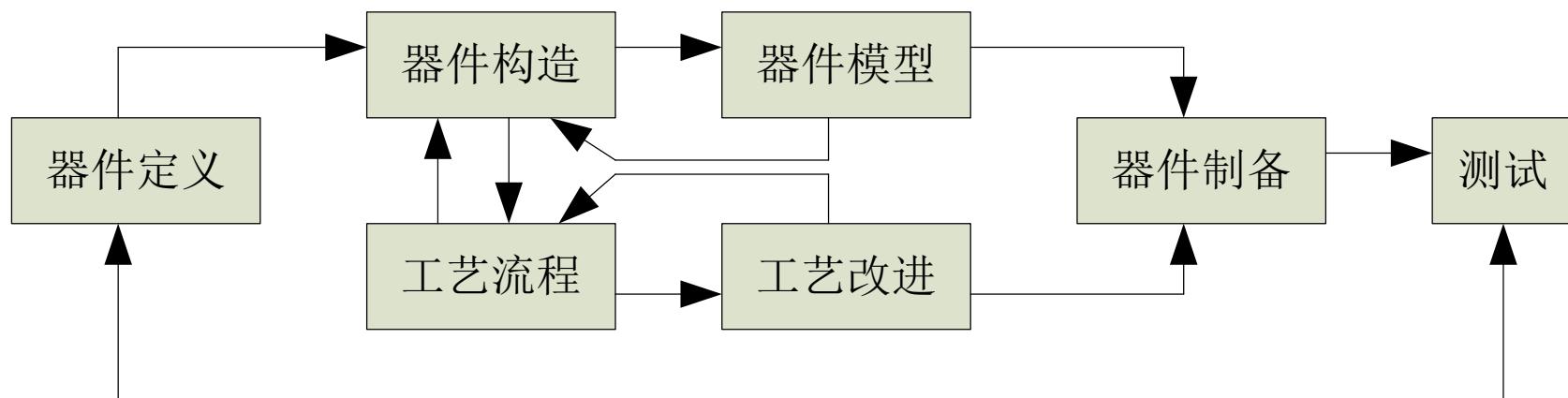




§ 4.4 典型微机械结构的制造

1、微传感器

以表面加工为基础的微传感器的设计与研究主要取决于工艺水平与新结构开发之间的相互关系，下面是基于微机械加工技术的微传感器设计、制备和测试流程图。



一般来说，我们要研究一种微传感器，首先要明确它的功能及要求，然后进行结构设计，在进行结构设计时，必须要考虑它的加工方法和步骤，即工艺流程，而且这两者之间的相互关系要反复多次才能协调起来。





2、 硅微压阻式加速度传感器

1) 加速度芯片的制作:

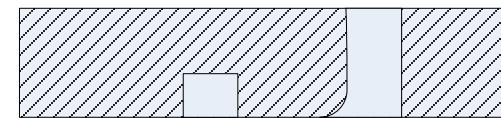
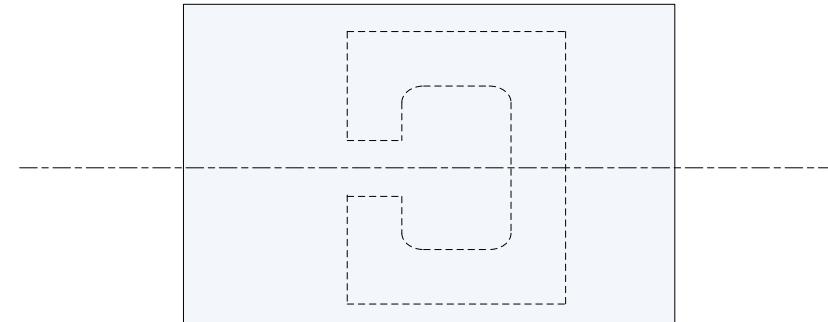
从设计传感器的角度，首先根据功能要求确定加速度芯片的结构。如：质量块的质量大小，对应的外形尺寸；梁的尺寸，应变电阻的位置，应变电阻阻值的大小，引出方式等；对应最大量程，质量块的最大振幅以及极限振幅。

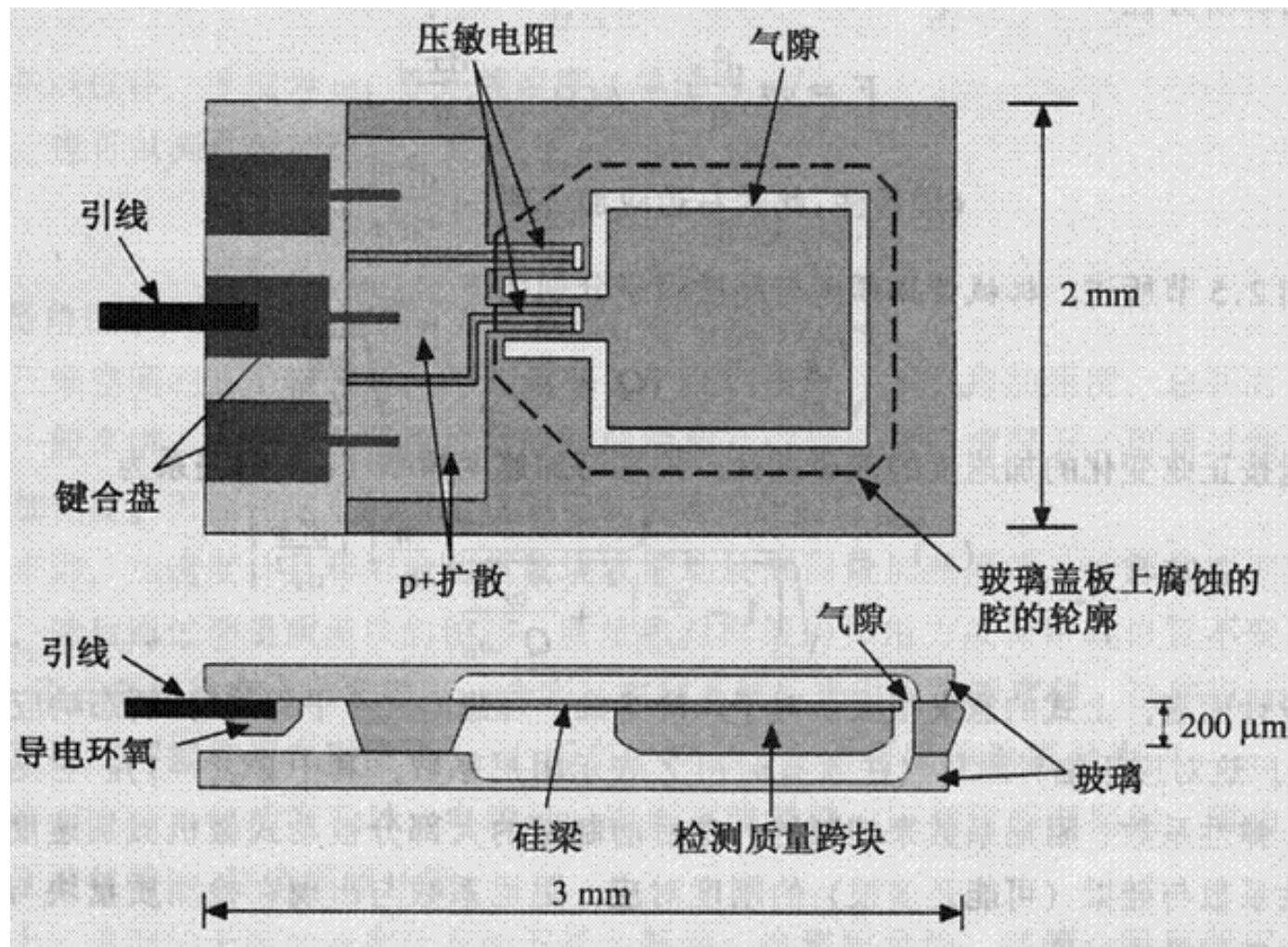
在上述工作的基础上再进行结构设计；在进行结构设计的同时需考虑加工的工艺，即加工手段、方法和加工次序。

a) 芯片的选择

N型（100）硅晶体。

b) 压敏电阻的制作





微机械压阻加速度计的整体结构





按照集成电阻的制作方法进行：先采用热氧化的方法生成 $1.5\mu m$ 厚的氧化层，再进行光刻和扩散形成电阻。

c) 质量块和悬臂梁的制作

采用热氧化的方法生成一层 SiO_2 膜作为掩膜；采用光刻工艺刻出悬臂梁及质量块的图形；采用各向异性或干法腐蚀工艺，将没有被掩膜覆盖的部分腐蚀掉，从而刻出梁周围空气隙和窗孔。

2) 上下两层玻璃盖的制作

a) 材料的选型

7740型玻璃，注意玻璃的热膨胀系数要与硅片相同（一致）。

b) 槽井的制作

槽井的外形尺寸及深度取决于前面的设计值，槽井也是采用制作掩膜，然后进行光刻，再腐蚀的方法进行。

c) 在上玻璃片上制作金属焊接片





先对玻璃面进行抛光处理，使之达到光学平整度，然后用Cr-Au膜做掩膜，通过光刻、淀积工艺，形成金属焊接片。

d) 做好键合前的准备工作

3) 静电键合

将准备好的玻璃片与硅片对准贴合在一起，在 $t=400^{\circ}\text{C}$ ， $U=600\text{V}$ 的条件下进行键合密封，键合要分两次进行（考虑极性的影响）。

4) 检测与校正

3、微型同步马达

下图是微型同步马达的结构图，

与参考教材中所讲的涡轮机结构有点类似。

1) 它的制作过程：

a) 在硅片上先热氧化生长一层 SiO_2 ($h=0.3\ \mu\text{m}$)；再淀积一层 ($h=1\ \mu\text{m}$)；然后淀积第一层多晶硅 ($h=0.3\ \mu\text{m}$)，通过光刻形成转子



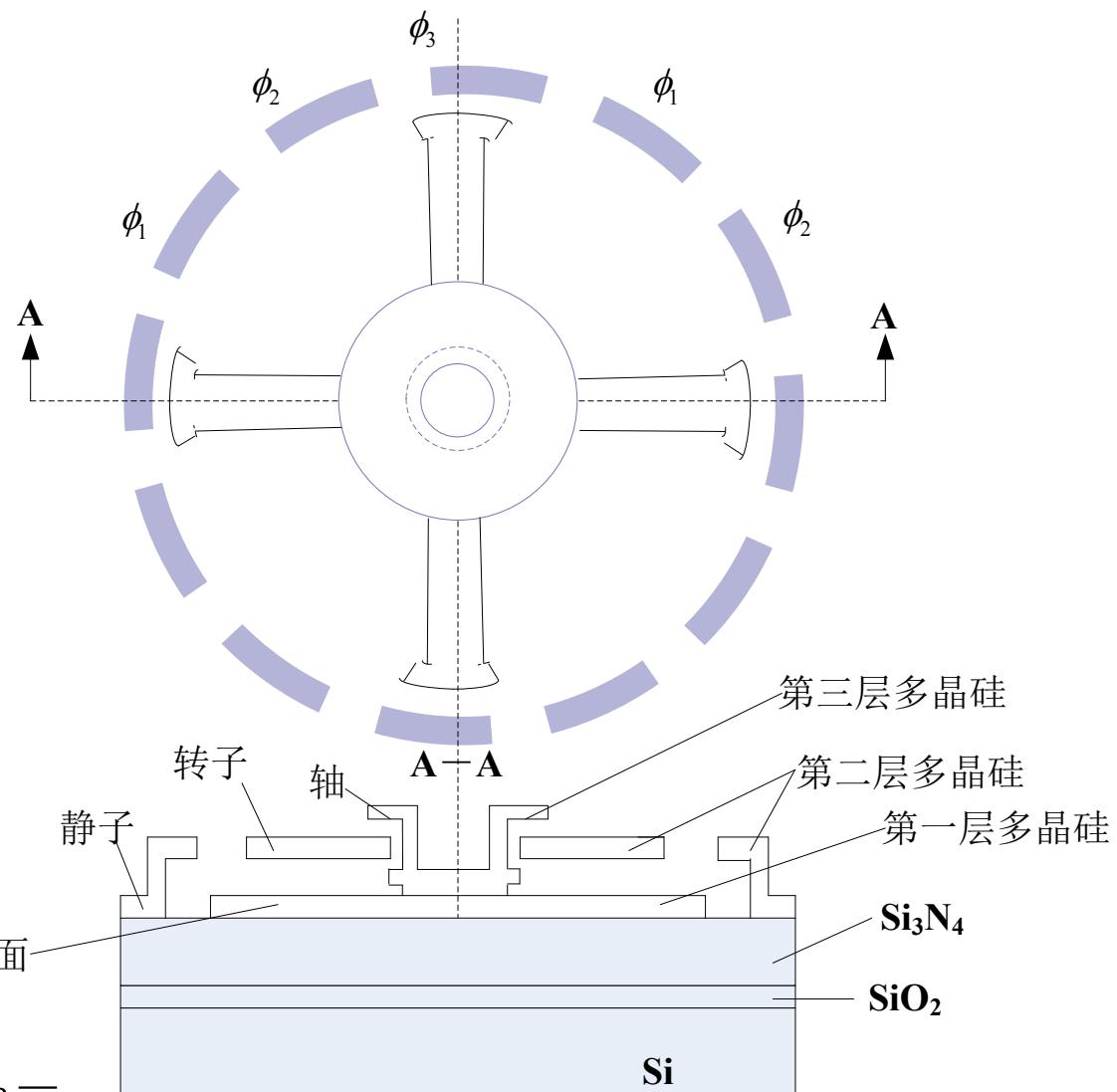


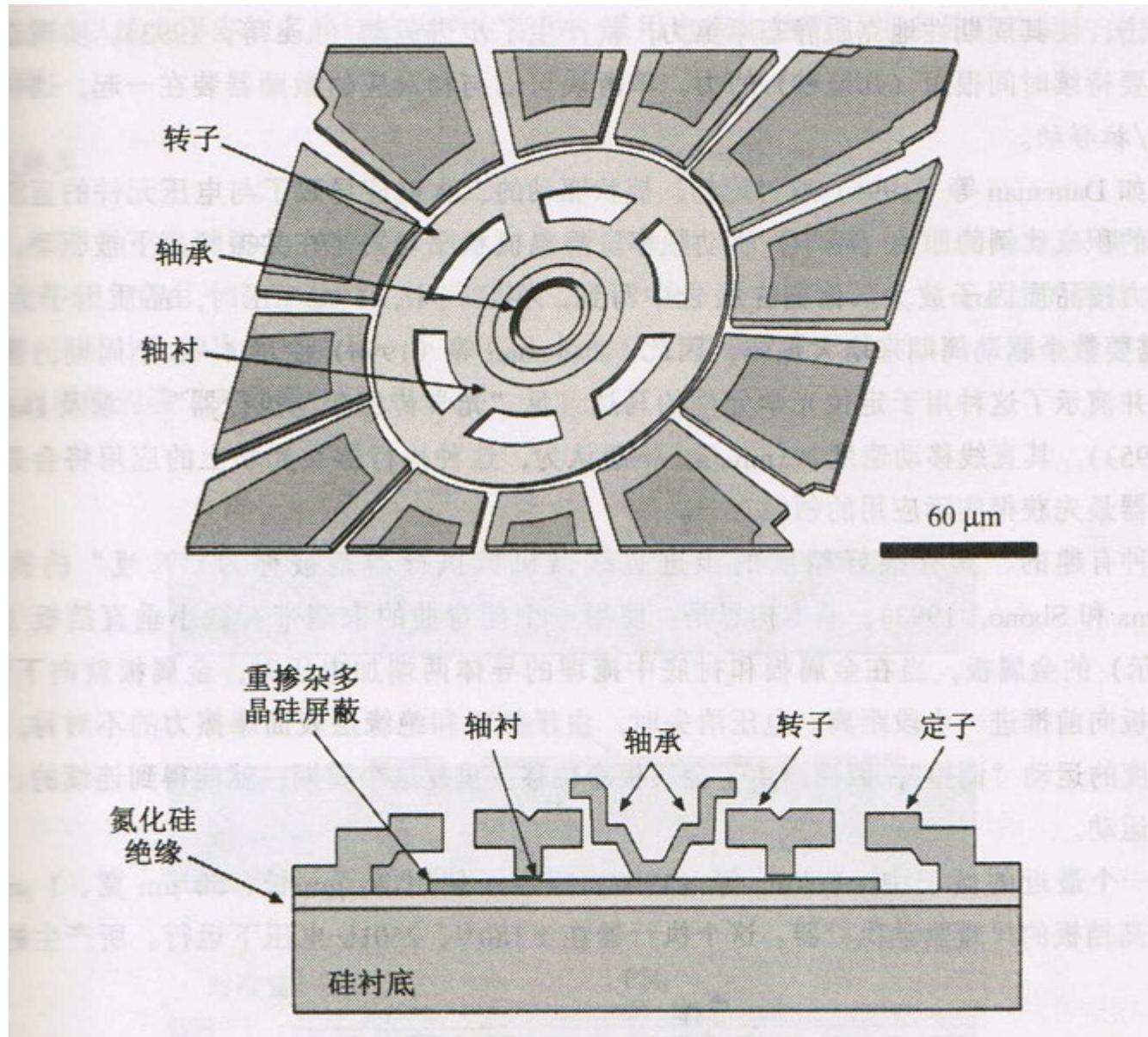
的接地面。

b) 淀积一层PSG（磷硅玻璃， $h=2.2\text{ }\mu\text{m}$ ）并进行光刻，然后淀积第二层多晶硅($h=1.5\text{ }\mu\text{m}$)，并对多晶规进行氧化($h=0.1\text{ }\mu\text{m}$)，光刻后形成静子和转子。

c) 淀积一层 Si_3N_4 ($h=0.34\text{ }\mu\text{m}$)，然后用 (RIE，反应离子刻蚀) 刻蚀 Si_3N_4 ，使之形成衬套。

d) 湿法腐蚀PSG形成凸缘，然后再淀积一层PSG ($h=0.7\text{ }\mu\text{m}$) 以填充转子下的侧向腐蚀部分。







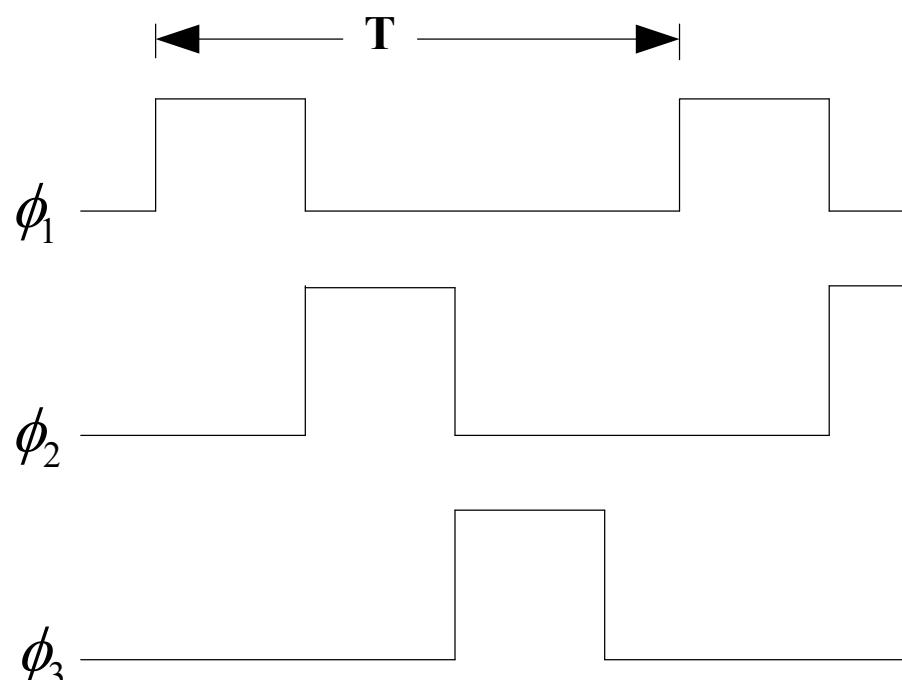
e) 开出轴空，淀积第三层多晶硅并光刻形成图形。

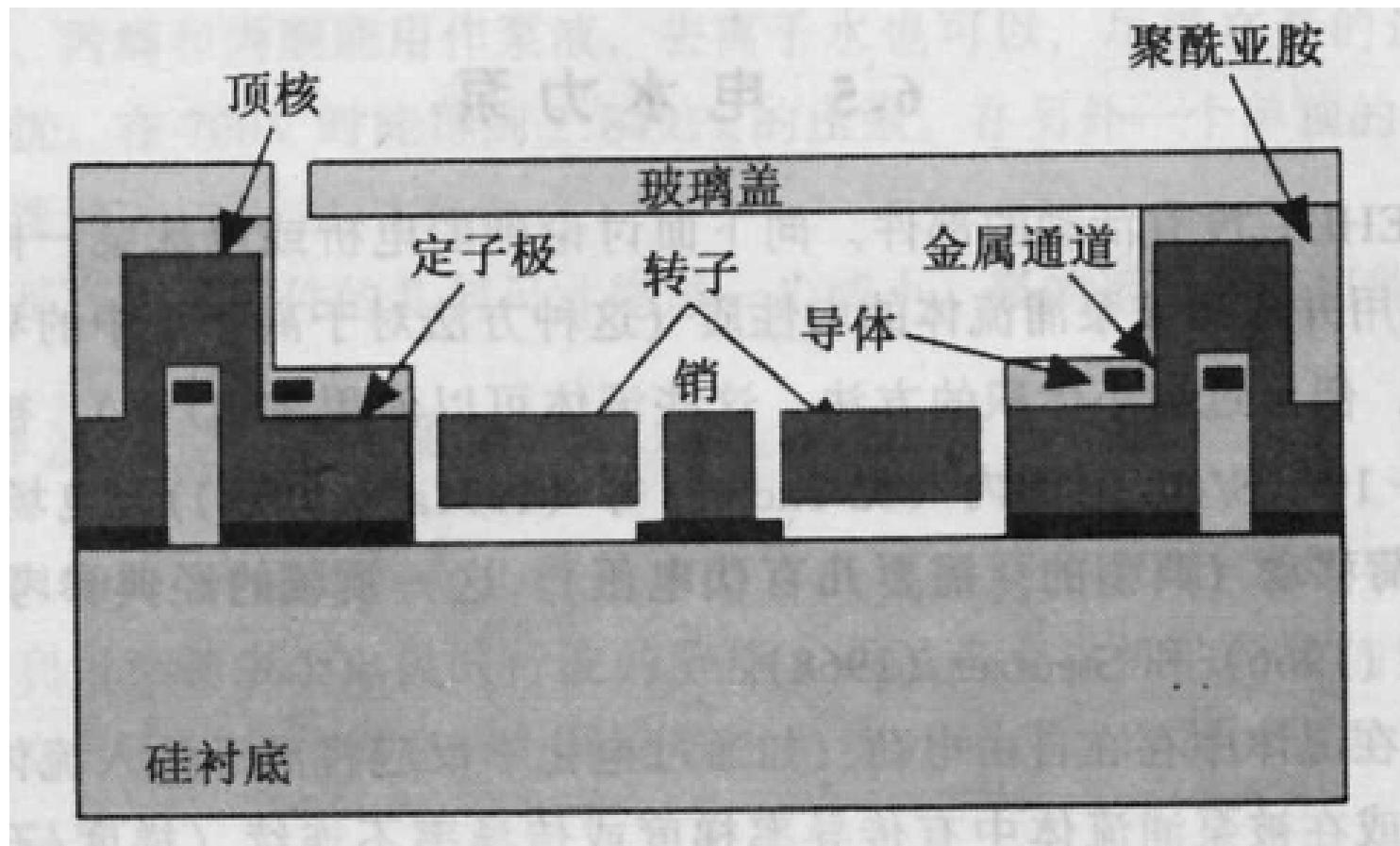
f) 最后用BHF (10 NH_4F +1 HF) 腐蚀掉所有的PSG。

2) 工作原理

在上图中，加三相脉冲电压，
波形如右图所示。由于静电感应，
转子与定子间静电力的作用，将
使转子顺时针方向转动。当
 $U=350V$, $n\approx 500$ (转/min)。

3) Si_3N_4 的作用
多晶硅之间的摩擦力大于多晶
硅与 Si_3N_4 之间的摩擦力，起减小
摩擦力的作用。





微机械磁旋转泵的横截面图





§ 4.5 集成智能传感器系统

参考教材中介绍了好几种集成智能传感器的例子，这里仅讲解两种，一种是集成血液流量微传感器，另一种是集成智能传感器。

§ 4.5.2 集成血液流量微传感器

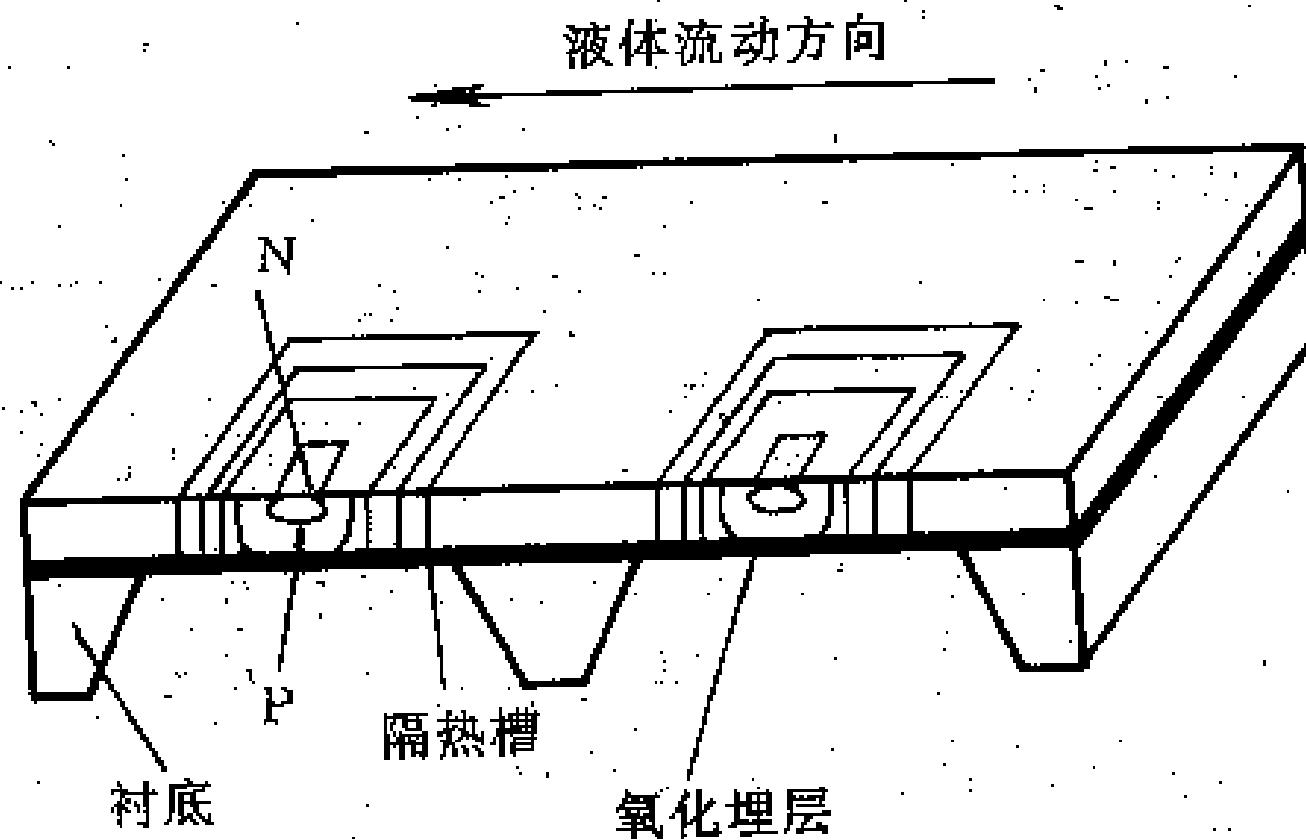
1、明确设计要求

- 1) 功耗: $P < 10\text{mW}$;
- 2) 温度要求: 传感器的工作温度与血液温度间的温差 $\Delta T < 5^\circ \text{K}$;
- 3) 外形尺寸: 可置于2mm的导管内工作;
- 4) 传感器置于血管内无不良反应, 亦即表面材料与血液相容。

2、传感器的设计和工作原理

1) 工作原理

利用流速改变薄膜温度的原理，在晶片背面腐蚀形成两个硅膜片，每个膜片上有一个温度二极管，其中一个膜片由一个功耗恒定的电阻器加热。流动的液体与整个芯片接触，使被加热的薄膜冷却，薄膜的温度变化



流量传感器工作原理结构示意图





依赖于液体流动速度的变化。另一个未被加热膜片上的P—N结用来监测环境温度。根据两个P—N结测出的温差就可以反映出液体流动的速度。

P—N结的温度特性：

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right) - 1 \right], \quad I_0 : \text{饱和电流};$$

η ：二极管指数。

若保持I恒定，则结电压V是T的函数。灵敏度为：2.1mv/k， $I=10 \mu A$ 。

2) 设计：

以SOI晶片衬底，晶片的背面作为P—N结的制作面；正面利用CMOS工艺制作集成电路部分，它包括：放大电路、脉宽调制电路以及控制单元。

为提高流量传感器的灵敏度和降低功耗，加热膜周围刻有8个隔热微槽，微槽中充满二氧化硅层。

为防止电路短路，在上边淀积了一层氮化硅钝化层。

共有四个传感器。





外形尺寸: $1 \times 5 \text{ mm}^2$, $\Delta T < 2\text{K}$, $P < 5\text{mW}$;

流量为 $0 \sim 10\text{L/min}$ 时, $\Delta t: 45 \mu\text{s} \sim 25 \mu\text{s}$ 。

3、传感器的制作流程

1) 选用的工艺: $2 \mu\text{m}$ CMOS工艺

2) 选材: 晶片为 $h=300 \mu\text{m}$ 的P型(100)晶片。

3) 制作

a) SOI晶片的制备

* 采用氧离子注入工艺, 再退火处理, SiO_2 层厚= 400nm ;

* 在 SiO_2 层上淀积 200nm 的单晶硅层。

b) 制作隔离槽

* 在单晶硅层上外延生长一层 $5 \mu\text{m}$ 硅层;

* 用等离子体刻蚀的方法, 在外延层上刻蚀出 $5 \mu\text{m}$ 深的隔离槽;

* 热氧化使隔离槽充满二氧化硅;





- * 在表面淀积一层多晶硅，再将该多晶硅层腐蚀掉，使表面平坦。
- c) 制作其它电路
- * 采用离子注入形成P阱和N阱
- * 制作温敏二极管及其它电路。

一般电路部分先制作。为起保护作用，在SOI晶片两面用PECVD方法淀积700nm厚的氮化硅。

4、 系统结构

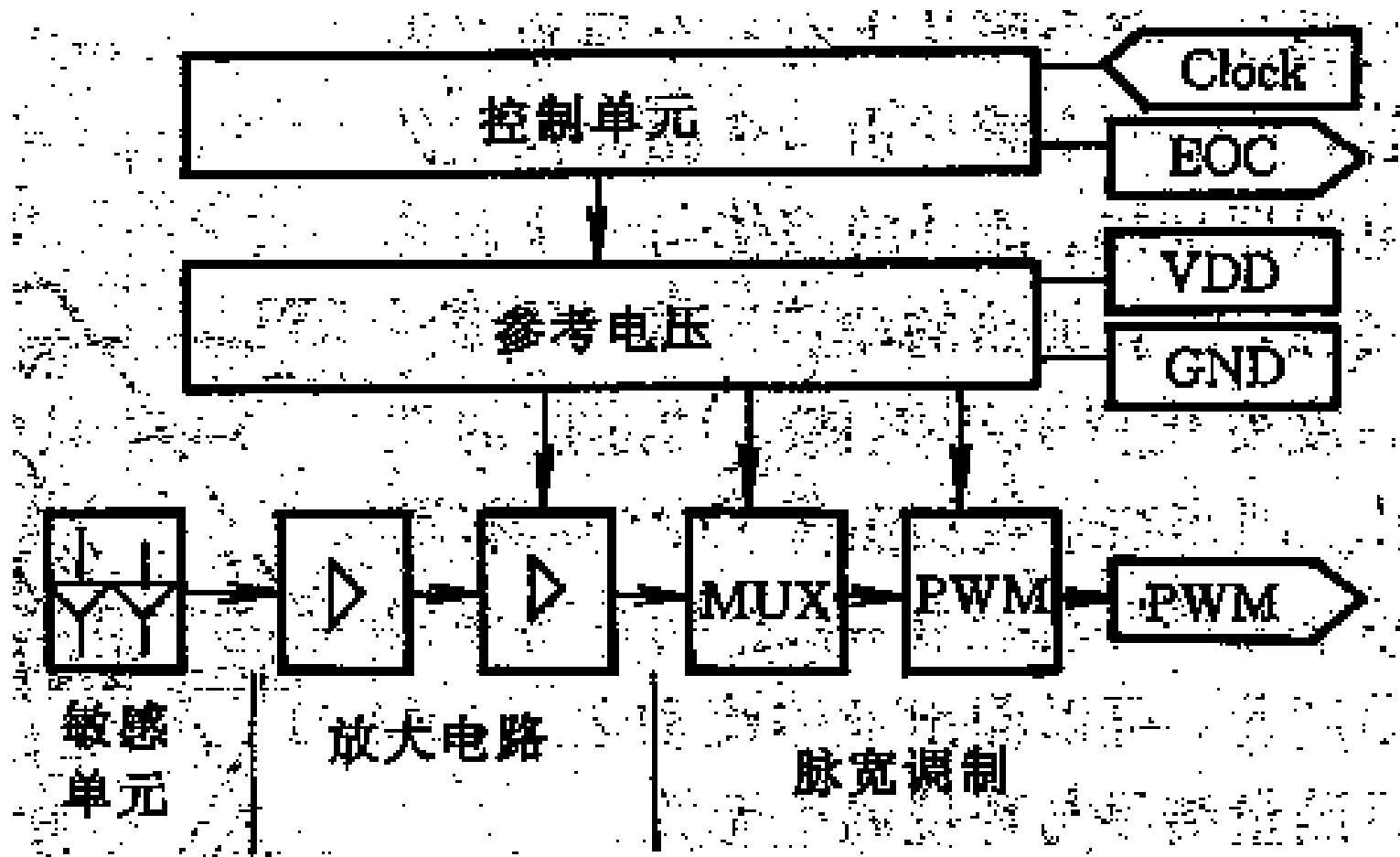
主要是由放大电路，脉宽调制电路（电压调制以及控制单元、供电电源等组成，其中温敏二极管的电流要恒定。

§ 4.5.4 集成智能传感器

这里主要介绍一种混合式的智能传感器系统。它的主要特点是：

- 1) 由多种传感器及其阵列构成的一个传感器系统；
- 2) 各种传感器及其阵列通过相应的接口电路构成标准输出，并通过





传感器电路系统结构框图





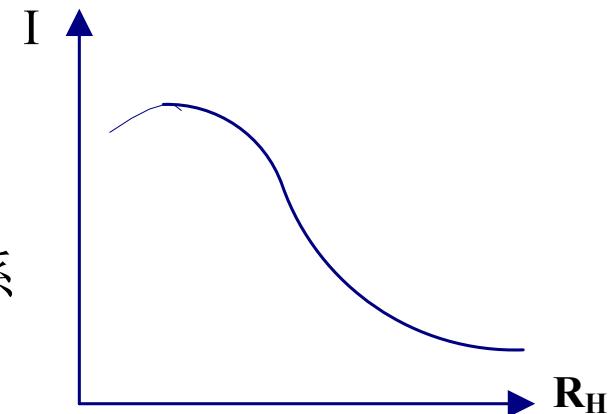
内部总线与后台的MCU进行数据传递。

- 3) 对外通讯可采用无线发送器或RS—232接口两种方式;
- 4) 具有电源管理功能。

1、各种传感器

被测对象： T、 P、 h (humidity) 、 S、 a;

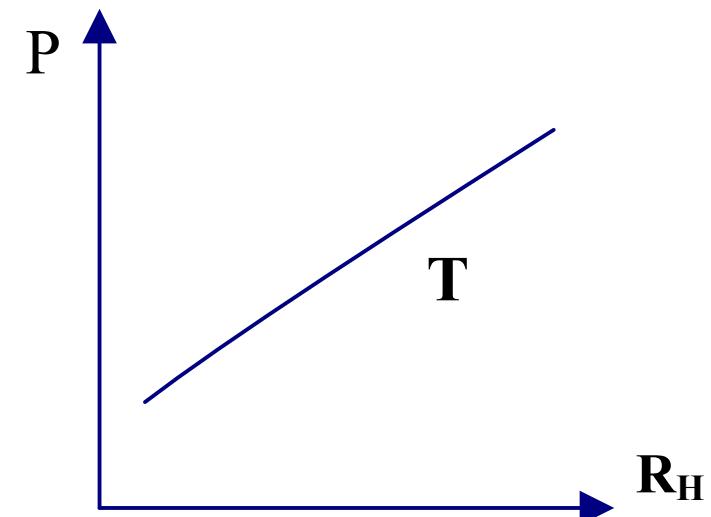
- 1) T: 振荡器的形式，振荡频率与温度有关，主要作温度补偿用
- 2) P: 微机械电容式传感器阵列；（根据量程大小选用合适的传感器）最高精度可达1m的压力变化；
- 3) h: 利用内置的高纵横比数字湿度计；
可集成化测湿度的传感器有：
 - a) 湿敏二极管：雪崩电流～相对湿度的关系





b) 硅MOS型 Al_2O_3 湿度传感器，利用 Al_2O_3 膜作为感湿膜。器件的电容值~环境湿度的关系。

c) FET湿度传感器，与b) 类似。



4) a: 微机械电容式加速度计阵列，采用4梁支撑的桥式结构。

5) 其它功能的扩充：

气体种类、浓度、声音、全球定位系统（GPS）。

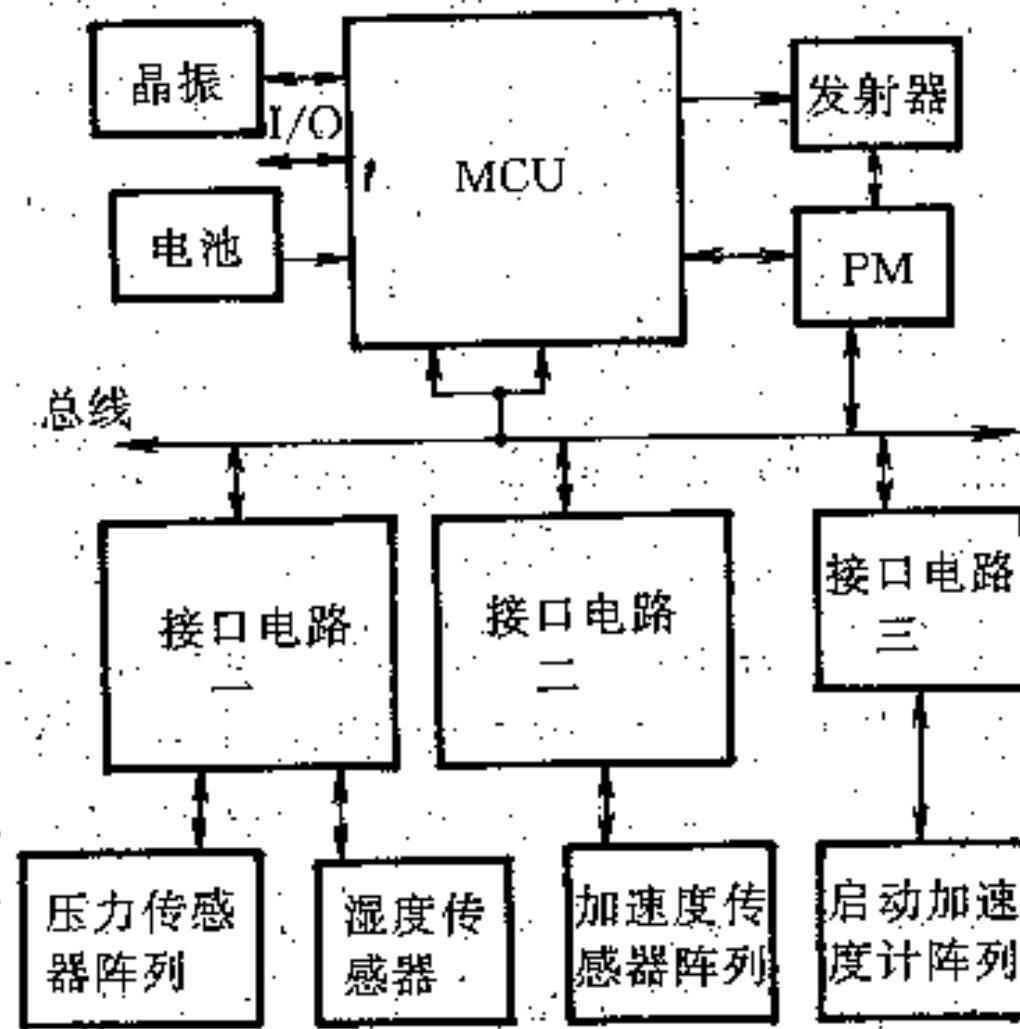
2、 内部通讯

1) 总线构成

三根电源线：+6V；+5V（参考电源）；地。

四根前台电路输入线：1MHz时钟；串行数据线；芯片启动；选通线。





混合智能传感器系统组成框图





两根前台电路输出线：数据输出；数据校验—带中断功能。

2) 接口电路

包含开关电容读出电路，将传感器输出的电容信号转换为可传输的数字量。

3、对外通讯

1) RS-232接口

两根异步串行通讯线。

2) 无线发送

315MHz振幅调制发生器，数据传输率为3KHz。

工作电源： $U=3V$ ， $I=4mA$ 。

信号格式：1（起始位）+8（数据位）+1（奇偶校验位）+1（停止位）

若配有无线，调制频率可达2.4GHz，传输距离 $L \geq 1000m$ 。





4、电源管理：（PM）

供电电源方式：1) 外部电源供电，2) 锂电池；

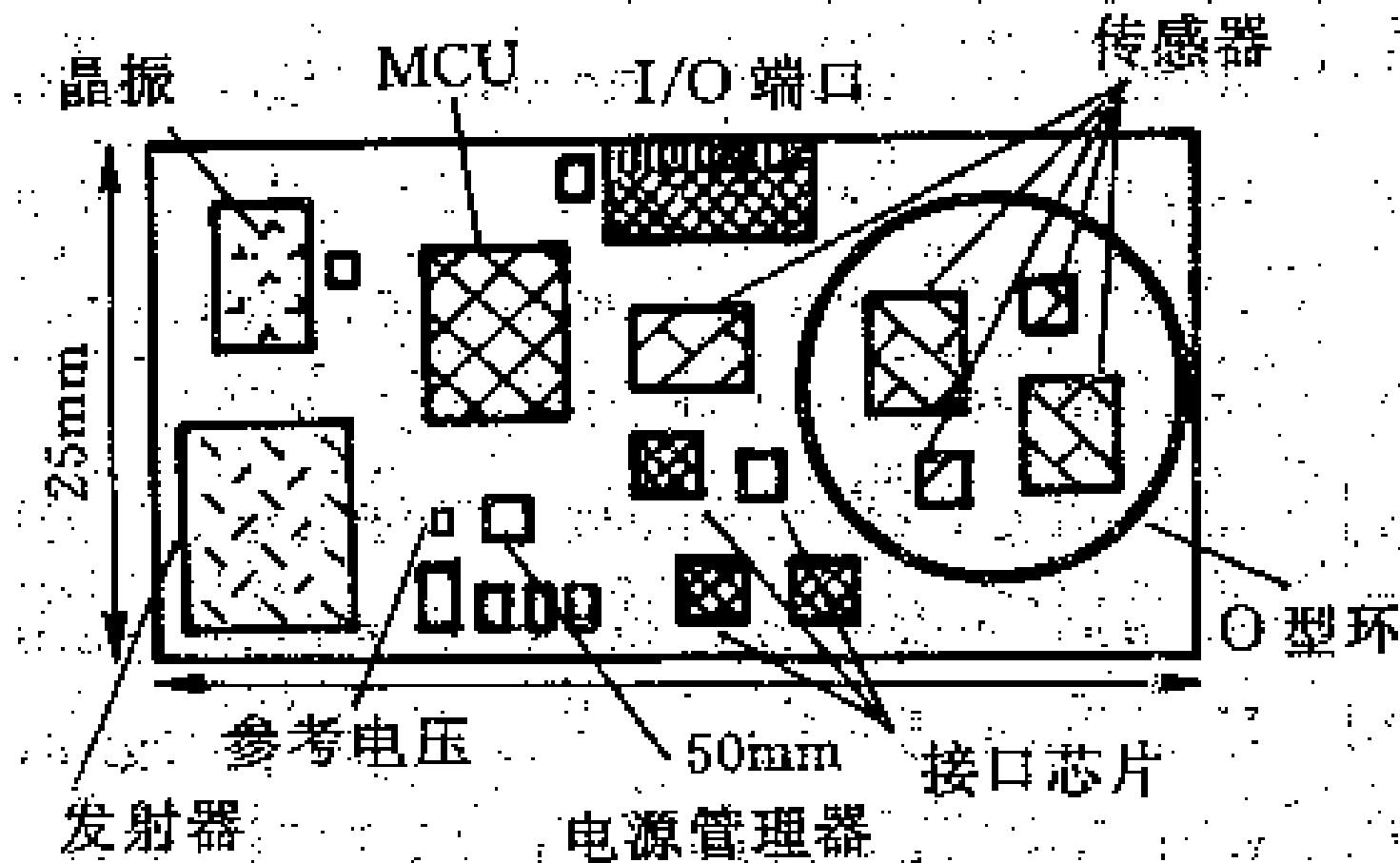
系统的工作状态分：扫描状态（休眠状态）和工作状态（唤醒状态）。

启动加速度传感器阵列的作用：起突发事件的响应作用，然后使MCU进入正常工作状态。

5、封装

解释折叠式结构。





各种器件在线路板上的实际布局

