

微电子工艺

第一章 绪论

导体，绝缘体，半导体

硅片重要特性

- 纯度很高，含有一定量的氧，有助于移动离子玷污
- 非常扁平
- 尺寸精确
- 精确的电阻率和掺杂
- 晶向需要为 $\langle 1,1,1 \rangle$ 或 $\langle 1,0,0 \rangle$
- 表面粒子数需要非常少

硅片制备

- 提炼硅
 - 方式比较复杂，需要先生成冶金级硅(MGS)，而后制备电子级硅(EGS)
 - 单晶生长
 - CZ法工艺
 - 将熔化了半导体级硅(SGS)变为具有正确晶向并且低掺杂的固体
 - 可以忍受高温
 - 可以制造大尺寸的晶体
 - 成本较低
 - FZ法工艺
 - 不采用坩埚，在压力反应室中进行，由RF线圈直接加热
 - 纯度最高，含氧量少
 - 改善对整个单晶长度上电阻率的控制
 - 玷污控制
 - 玷污类型:颗粒，金属杂质，有机物污染，自然氧化层
 - 半导体制造中可以接受的颗粒大小为: 小于器件特征尺寸的一半
 - 危害工艺的典型金属杂质为碱金属
 - 可动离子玷污(MIC)
 - 电学测试的体现之一 -> 改变了晶体管的阈值电压
 - 自然演化层:暴露于室温下的空气或含溶解氧的去离子水中硅片的表面被氧化
 - 影响半导体性能和可靠性
 - 阻碍其他工艺步骤的进行，如在硅片上单晶薄膜的生长和超薄栅极氧化层的生长
 - 引起金属导体中的接触问题
 - 自然氧化层从各种包含某些金属杂质，可以向Si中转移并形成电学缺陷
 - 静电释放(ESD)
 - 静电荷从一个物体向另一个物品未经控制的转移
 - 玷污源
 - 空气 超净间
 - 人是颗粒的最大来源，来自于人头发、头发物品、衣服纤维等

- 使用超净服 对身体产生的颗粒等的控制
- 系统方法控制净化区域的输入输出
 - 控制气流, 空气, 温度和湿度等状态
- 使用去离子水
 - 去离子水中不允许含有溶解离子
- 硅片的湿法清洗
 - 去除表面玷污: 颗粒, 有机物, 金属和自然氧化层
 - RCA清洗: 工业标准, 由一系列有序的浸入两种不同的化学溶液组成
 - 1号标准清洗液 -> 去除颗粒和有机物质
 - 2号标准清洗液 -> 去除金属和某些有机物
 - 使用温度 -> 75~85摄氏度
 - 高温, 大量使用化学药品和超纯水
 - 改进的RCA清洗
 - 稀释的化学清洗剂=
 - 最后的HF步骤, 去除表面的自然氧化层

芯片制造

- 横向加工: 图形的产生与转移, 又称为光刻
- 纵向加工: 掺杂 (扩散, 离子注入) 薄膜制备 (热氧化, 蒸发, 溅射, CVD)
- mos制备工艺
 1. 显影(第一次图形转移)
 2. 刻蚀(第二次图形转移)
 3. 去胶
 4. 掺杂
 5. CVD淀积SiO₂
 6. 光刻接触孔
 7. 蒸镀铝膜
 8. 光刻铝电极

第二章 PMOS基本工艺

材料的准备-提纯硅

硅片的制备-得到适合集成电路的硅片

芯片的制备-在硅片上制造出刷哦与一定功能的器件和电路

- 成膜(layering)
 - 在硅片表面生长不同的膜层
 - 方法: 生长、淀积
- 图案生成
 - 去除硅片表面膜层的所选区域, 构建器件图形和结构
 - 光刻(生成临时图像)、刻蚀(生成永久图像)
 - 图像生成是最关键的工艺步骤
- 掺杂
 - 根据图案生成的窗口建立N型和P型区域

- 主要工艺为扩散和离子注入
- 热处理
 - 加入硅片以达到预期的结果
 - 主要工艺
 - 退火(1000摄氏度)
 - 合金化(450摄氏度)
 - 硅片清洗
 - 去除硅表面的玷污而不对硅产生任何损害或结构的改变
 - 湿法清洗、蒸汽清洗、等离子体清洗、超声清洗和抛光等
- 封装-为完成的芯片加上保护套

PMOS晶体管的工艺流程简介

1. 生成一层厚二氧化硅，作为掺杂阻挡层，也称场氧
2.
 1. 涂胶
 2. 曝光，产生临时源漏区图形
 3. 显影，形成源漏区图形
 4. 湿法刻蚀source/drain的二氧化硅层
 5. 除胶。在二氧化硅上留下一个永久的图形
3.
 1. (doping)采用SOD。P通过二氧化硅上的窗口进入si中，初步形成source和drain区
 2. (heat treatment)利用高温(1000摄氏度)驱使掺杂杂质深入si中，最终形成source和drain
4.
 1. 湿法刻蚀去除SOD和场氧化层
 2. 生成一层场氧化层
5.
 1. 涂胶
 2. 曝光形成光刻胶的栅区图形
 3. 显影，完整的栅区临时图案
 4. 湿法刻蚀去除栅区的场氧化层
 5. 去除光刻胶
6. 生成薄氧化膜作为晶体管的栅氧化层(真的很薄很薄)
7.
 1. 涂光刻胶
 2. 光刻胶曝光，生成接触孔图形
 3. 光刻胶显影，生成接触孔的临时图案
 4. 接触孔区刻蚀
 5. 去除光刻胶
8.
 1. 在整个wafer表面进行铝层沉淀
 2. (热处理)铝在合适的温度下(450度)与si形成较好的欧姆接触
9.
 1. 涂光刻胶
 2. 曝光，生成临时图案，确定金属互联和栅电极
 3. 光刻胶显影，金属互联线和栅接触点的临时图案
 4. 刻蚀金属形成互连线和栅接触点
 5. 去除光刻胶，工艺结束
10. 进行测试

第三章 单步工艺-光刻

光刻功能

- 利用类似于洗印照片的原理，通过曝光和选择性化学腐蚀等工序将掩膜版上的集成电路图形印制到硅片上的精密表面加工技术
- 通过光学方法进行图片复制的过程
- 2D图形转移
- 形成与掩膜版上完全对应的几何图形，这样光刻胶可以用作刻蚀的掩蔽膜

光刻3要素

- 光刻胶
 - 混合物，在一定波长的光照射下结构发生改变
 - 分类
 - 正胶
 - 经过光照的部分发生裂解
 - 未照射的部分凝固
 - 分辨率高，粘附性好，成本高
 - 负胶
 - 经过光照的部分发生交联，在显影液中不溶解
 - 感光速度高，粘附性好，抗腐蚀能力强，成本低，分辨率低
 - 利用同样的掩膜版，用正胶和负胶得到的光刻图形完全相反，图形互补
- 掩膜版
 - 用来转移图形的母版
 - 碱石灰玻璃+Cr
 - 制造
 - 光学图形发射器
 - 电子束
 - 极性
 - 亮场 大部分透明，图形区不透明
 - 暗场 相反
- 光源系统
 - 适当波长
 - 波长越短，可曝光的特性尺寸越小
 - 衍射效应是光学曝光技术中心限制分辨率的主要因素
 - 足够的能量，并且曝光的能量均匀分布在曝光区
 - 光源分类
 - 紫外光光源
 - 深紫外光
 - 激光脉冲等离子体
 - 电子束、X光、粒子束
 - 光刻流程
 1. step1
 1. 表面清洗和脱水烘烤
 - 清洁干燥的硅片表明能与光刻胶保持良好的粘附并有利于获得平坦的光刻胶图层
 - 方法：刷片、化学清洗
 - 烘烤方法：在150度~200度真空或干燥氮气中
 2. 增粘处理
 - 绝大多数光刻胶为疏水的，而氧化物表面羟基为亲水的，两者表面粘附性不好

- 典型的增黏剂：HMDS
- 亲水的带羟基的硅烷醇。。。.
- 涂覆方法：蒸气涂布法和旋转涂布法

3. 涂胶

- 胶厚均匀性很重要
- 越厚分辨率越低
- 胶的厚度与转速有关
- 甩胶设备
 - 静态光刻胶分配
 - 动态的固定臂分配
 - 动态移动臂分配
- 卷边去除(EBR)
 - 卷边-> 晶圆外边缘上堆积的光刻胶
 - 曝光时聚焦出问题
 - 污染, 特别是卷边脱落造成的污染
 - 方法
 - 光学EBR,利用光使边缘的光刻胶曝光, 并且在显影时去除
 - 化学EBR, 在晶圆的正面或者背面涂溶剂, 溶解边缘上的光刻胶

4. 前烘

- 作用, 去除胶中的大部分溶剂, 提高胶的粘附性, 使胶的曝光特性稳定
- 典型前烘温度为90~100摄氏度, 10~30min

2. 对准与曝光

1. 对准, 指与前面工艺形成的图形进行套准
2. 曝光, 使光刻胶充分感光

3. 显影

- 利用溶剂去除光刻胶
- 正胶
 - 碱金属溶液 NaOH, NH_4OH , TMAH
- 负胶
 - 二甲苯
- 速率影响速率 显影液的浓度, 温度
 1. 曝光前烘焙
 2. 湿化学显影
 3. DI水漂洗
 4. 显影检查
 - 如果出问题还能去除光刻胶重做, 对于晶片基本无影响
- 5. 后烘(坚膜)
 - 去除残留溶剂 提高粘附力和抗腐蚀性
 - 烘烤条件100~140摄氏度

4. 形成永久图案

- 刻蚀: 湿化学 等离子来除去没有覆盖光刻胶的薄膜
- 离子注入: 在没有覆盖光刻胶的区域注入杂质

5. 去除光刻胶

1. 去胶
 - 湿法
 - 麻烦死了, 好难敲

- 干法
 - 相比于湿法，操作简单安全，难引入污染，能与干法腐蚀在一个设备中进行，不损伤下层衬底
- 2. 检查是否对准，是否存在缺陷

工艺其他点

- 光刻种类
 - 接触曝光，分辨率 $1-2\mu\text{m}$
 - 优点
 - 简单，成本低
 - 一次曝光一块硅片，速度快
 - 间隙为0，衍射误差较小(衍射的影响较小)
 - 缺点
 - 掩膜版损耗、污染、
 - 掩膜版与硅片尺寸相同
 - 特征尺寸大
 - 聚焦深度小
 - 接近曝光：分辨率 $5\mu\text{m}$
 - 优点
 - 简单，成本低
 - 一次曝光一块硅片，速度快
 - 无掩膜版损耗和污染
 - 缺点
 - 掩膜版与硅片尺寸相同
 - 间隙不为0，衍射误差大
 - 特征尺寸大
 - 聚焦深度小
 - 投射曝光，分辨率 $<0.5\mu\text{m}$
 - 优点
 - 无掩膜版损耗和污染
 - 掩膜版比实际尺寸大5~10倍
 - 对掩膜版要求低，精度高
 - 缺点
 - 一次曝光一个管芯，速度慢
 - 设备昂贵
- 工艺中可能出现的问题
 - 甩胶缺陷
 - 套准缺陷
 - 显影缺陷
 - 光刻胶脱落缺陷
- 光刻误差
 - 表面反射：Ghost现象
 - 穿过光刻胶的光会从硅片表面反射出来，从而改变光刻胶吸收的光能，特别是硅片表面的金属层会反射较多的光
 - 硅片表面倾斜的台阶侧面会将光反射到飞曝光区
 - 解决办法

- 改变淀积参数控制反射率
- 使表面平坦
- 光刻胶下面加一层防止反射的物质
- 对准Overlay(对准误差)

第三章 单步工艺-MEMS光刻

深槽光刻

- 表面微结构
 - 表面起伏 $1-2\mu\text{m}$
 - 在MEMS制造中，表面带有微结构和深槽， $10\sim 100\mu\text{m}$
 - 旋涂，会发生光刻胶聚积
 - 喷涂
 - 电镀
 - 曝光问题，入射光反射
 - 版图设计时候进行补偿
- 厚胶光刻
 - 集成电路光刻厚度 $1\mu\text{m}$
 - MEMS中光刻层厚度 $1\mu\text{m} - 1\text{mm}$
 - 问题
 - 曝光衍射和散射
 - 分辨率下降
 - 曝光剂量不够
 - 采用聚焦深度递进的方法对厚胶进行曝光，降低失真
- 双面光刻
 - KOH 进行背部刻蚀，制作压阻式压力传感器
 - 并且会形成深槽，但是是斜着的

第四章 单步工艺 刻蚀

刻蚀简介

- 向基底深度方向进行的技术，实现三维结构的重要方法
- 选择性去除部分材料
- IC(只刻蚀薄膜) MEMS(刻蚀薄膜和衬底)
- 分类
 - 湿法刻蚀
 - 液体刻蚀剂
 - 干法刻蚀
 - 气体刻蚀剂
 - 等离子体刻蚀
 - 各向同性
 - 完全各向同性：水平刻蚀速率 = 垂直刻蚀速率
 - 各向异性
 - 完全各向异性：水平刻蚀速率 = 0

湿法刻蚀

- IC湿法刻蚀
 - 二氧化硅刻蚀
 - HF + 水
 - 二氧化硅和硅的选择比接近无穷大
 - 缓冲氢氟酸BHF
 - 加入 NH_4F 保持恒定的 H^+ 浓度，以获得稳定的刻蚀速度
 - 氮化硅刻蚀
 - 沸腾磷酸溶液刻蚀氮化硅
 - 刻蚀速率: $\sim 100\text{\AA}/\text{min}$ @180摄氏度
 - 选择比
 - 氮化硅: 二氧化硅 = 10: 1
 - 氮化硅: 硅 = 30: 1
 - 铝刻蚀
 - 硅或二氧化硅表面AL
- MEMS湿法刻蚀(刻蚀薄膜和硅)
 - 各向异性和各向同性刻蚀，各有不同
 - 各向异性湿法刻蚀 可是速度与晶向有关，不同晶向的基底刻蚀结果不同
 - (100)掩蔽层中， Si_3N_4 基本不刻蚀， SiO_2 1- 10nm /min
 - 影响速度的关键
 - 温度不均匀性
 - 反应物浓度随刻蚀进行不断降低
 - 液体挥发，混合不均匀，反应物浓度不均匀
 - 晶向掺杂浓度
 - 利用刻蚀时间进行控制，
 - 利用浓度掺杂来进行控制
 - 利用pn结来控制刻蚀停止
 - 反偏pn结
 - 不稳定，操作复杂，需要复杂的刻蚀
 - 刻蚀的保护
 - 双面刻蚀或者带有ic以及加工好的结构，需要保护
 - 保护方式: 机械夹具 黑胶 浮片
 - 各向异性湿法刻蚀
 - 乙烯乙二醇邻苯二酚(EDP)
 - 刻蚀过程非常稳定可控，刻蚀铝，致密，腐蚀
 - 压阻压力传感器由承载薄膜和膜片的应力敏感压阻构成，当膜片在压力作用下变形时改变压阻阻值，通过电桥测量阻值变化可以得到压力大小
 - 优缺点
 - 操作简单，成本低
 - 碱金属与IC不兼容，引起粒子污染
 - 各向异性较差
 - 难以精确控制
 - 一般不用于重要图形的刻蚀
- 干法刻蚀
 - 氯基:(Si的各向异性)
 - 气体: Cl_2 和 BCl_3
 - 刻蚀 Si Au Ti TiN Resist

- 氟基
 - 气体 SF6 CF4 CHF3
 - 刻蚀 Si TiW SiO2
- 氧基
 - 气体 O2
 - 刻蚀 有机物
- 等离子体
 - 由电子、离子、中性基团、气体分子同时存在的状态，是物质除固态、液态和气态之外的第四种状态
- 等离子体刻蚀
 - 物理：离子轰击(IBE)
 - 由电场加速的离子
 - 反应离子刻蚀
 - 等离子体中包括离子、中性基团等活性成分 - 化学反应，选择性尚可，各向同性
- 刻蚀气体：
- 如何在(100)硅片上刻蚀垂直的深槽
 - 干法刻蚀
 - 等离子体刻蚀，利用等离子体的反应离子和中性基团进行刻蚀
 - 气相keshi(XeF2):利用气相反应进行刻蚀
 - 深刻蚀
 - 时分复用
 - 叫做Bosch
 - 流程
 - 各向同性刻蚀：SF6等离子体实现各向同性刻蚀，刻蚀循环7-16s
 - 保护：C4F8生成氟碳化合物高分子膜，保护循环5~15s
 - 刻蚀温度
 - 液氮冷却：40度
 - 不停地循环
 - 电感耦合等离子
 - 电感耦合产生等离子体
 - 平板电极加速离子
 - 气体切换系统
 - 低温刻蚀
 - 刻蚀掩膜
 - AL Au
 - 刻蚀速率
 - 标称6um ~ 20um，一般为2~10um/min
 - 取决于刻蚀负载
 - 取决于深宽比
 - 侧壁形貌
 - 侧壁光洁度：起伏 < 50nm
 - 侧壁垂直度：90+-2度
 - RIE-lag
 - 刻蚀速率与刻蚀结构的深宽比有关，深宽比越大，刻蚀速率越小
 - 小尺寸刻蚀速率低，同样的结构越刻蚀深度越低
 - 横向刻蚀 Notchening

- 可以做出悬浮的结构
- 其他刻蚀
 - 刻蚀与剥离
 - 对于难以刻蚀的金属，MEMS常用剥离形成图形

第五章 单步工艺 掺杂概述

- 目的：有目的的把掺杂掺入硅中
 - 准确控制，局部掺杂
 - 明显的改变硅的电性能
 - 非常小的比例杂质就可以提高si的电导率
 - 掺杂浓度为 10^{17} cm^{-3} ，相当于在si中掺入百万分之几的杂质
- N型掺杂
 - 电子为主要的载流子，掺杂物为在si中掺入少量V族元素
- P型掺杂
 - 空穴为主要载流子
 - si中掺入少量的三族元素(B)可以获得P型
- 掺杂方式
 - 热扩散：利用高温驱动杂质穿过si的晶格结构
 - 离子注入：通过高压离子轰击将杂质引入si片

扩散掺杂

- 扩散：基本掺杂技术，通过扣三可以将一定种类和少量的杂质掺入硅片或者其他晶体中，改变其电学性能
 - 掺杂可以形成双极器件的基区、发射区和隔离区等
- 基本过程
 - 预淀积：掺杂杂质以液体或者气体的方式进入到硅片很薄的一层中(800~1100摄氏度)
 - 推进：热使掺杂杂质更深的进入到晶元里面(1000~1250摄氏度)
 - 激活：杂质原子与晶格中的硅原子键合，温度略高于推进温度
- 固溶度
 - 在一定温度下，硅能吸收的杂质数量是一定的，称为固溶度
 - 硅中的杂质只有一部分被激活，并且提供用于导电的电子或空穴
 - 如果杂质占据间隙位置，就不会起到杂质的作用
 - 杂质只有在称为si晶格结构的一部分，才可以做为电子的施主或受主
 - 加入有助于杂质移动到正常的晶格上去，这一过程称为晶体激活
- 扩散机制
 - 填隙式，从半导体晶格的间隙中挤过去，一般扩散系数较高
 - 替位式，P As等容易与Si原子键合的杂质原子，主要代替硅原子而占据格点的位置，具有低扩散系数的杂质通常为替位式扩散
- 常见杂质的扩散系数
 - B 浓度为 10^{20} 以下时候，B的扩散系数与本征扩散率一致，当浓度超过 10^{20} 后，不是所有的B原子都能占据到晶格位置，有些原子处于填隙位置，使B的扩散系数急剧降低
 - As As在Si中扩散系数较低，因此常用于浅结扩散，此外高浓度下As扩散的电场增强效应很明显~~~~箱形分布，有利于浅结扩散
 - P 球的扩散吸收比As高得多，而且扩散分布比较平缓，因此不利于形成浅结，P扩散可用于较大尺寸NMOS的源漏区扩散和低频双极晶体管的发射区扩散

- 扩散系统
 - 杂质源：固态源 液态源 气态源
 - 扩散系统的形式：开管式扩散，闭管式扩散，箱法扩散及固固扩散

杂质分布规律

- 一维费克(Fick)扩散方程
 - 扩散是围观离子不规则运动的统计结果。使粒子由浓度较高的地方向浓度较低的地方进行，使分布趋于均匀。温度差越大，温度越高，扩散就越快
 - 费克第一定律
 - 单位面积内垂直扩散通过单位面积的粒子数，即扩散粒子的流密度，与粒子的浓度梯度成正比
 - $J(x,t) = -D \frac{\Delta C(x,t)}{\Delta x}$
- 费克第二定律，可以针对不同的边界条件和初始条件求出方程的解
 - 恒定表面浓度扩散
 - $C(z,t) = C_s(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\lambda} d\lambda) = C_s \operatorname{erfc}(\frac{z}{2\sqrt{Dt}})$
 - 特点
 - 杂质表面浓度 C_s 由于该种杂质在扩散温度下的固溶度所决定。扩散温度不变的时候，表面杂质浓度维持不变
 - 扩散时间越长，扩散温度越高，扩散进入总量越多
 - 越深
 - 适用于高表面浓度浅结
 - 恒定杂质总量扩散
 - $C(z,t) = \frac{Q_t}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{z^2}{4Dt}}$
 - 杂质总量保持不变
 - 扩散时间越长。扩散温度越高，杂质扩散越深，表面浓度越低
 - 表面杂质浓度可控
 - 适宜于制作低表面浓度的深结
 - 两步扩散
 - 双极晶体管中基区B扩散，一般用两步扩散，因为B在Si中的固溶度随温度变化较小，一般在 $1e20$ 以上，而通常要求基区的表面浓度不能太高，先获得深度，然后再获得较低的表面浓度
 - 第一步：预扩散(预淀积) 在较低的温度下，采用恒定表面浓度扩散方式
 - 第二步：主扩散、再分布或者推进扩散，较高温度下，采用恒定杂质总量扩散方式，淀积表面的杂质继续扩散
 - 两步扩散
 - $C(z,t_1,t_2) = \frac{Q_T}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp(-\frac{z^2}{4D_2 t_2})$
 - 再分布后的表面杂质浓度为 $\frac{Q_T}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} = \frac{2C_s1}{\sqrt{\pi} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}}}$