

# 《微电子工艺原理及应用》课程教学大纲

## 一、课程基本信息

课程名称	微电子工艺原理及应用 (Principle and Application of Microelectronics Technology)		
课程代码	400573	课程性质	专业必修课
课程学分	3	课程学时	48 (24 理论+24 实验)
授课对象	微电子科学与工程专业		
先修课程	固体物理、半导体物理、半导体器件物理		
培养方案	2020 版 (2023 修订)	开课单位	人工智能学院
课程简介	本课程是高等学校微电子科学与工程专业专业必修课。本课程较全面地论述了微电子材料的特性、制备工艺、实际应用等方面的知识,使学生对制作半导体器件、集成电路所用的微电子材料有充分地了解,以便在工作中能熟练的制备和使用这些材料。		

## 二、课程目标

本课程教学目标及其对专业人才培养的知识、能力和素质要求的支撑如下:

目标 1: 掌握微电子工艺原理及应用的基础知识,包括光刻工艺、CMOS 工艺等。

目标 2: 掌握微电子工艺原理及应用学习的基本思想和基本能力。

目标 3: 培养学生自主学习能力,能够通过网络检索中英文相关资料进行学习和实践,解决实际学习过程中遇到的问题。

## 三、课程学时安排

序号	章节/专题/模块名称	理论学时	实践学时	总学时
1	第一章 绪论	1	0	1
2	第二章 现代 CMOS 工艺技术	1	0	1
3	第三章 晶体生长与衬底制备	2	0	2
4	第四章 加工环境与基片清洗	2	0	2
5	第五章 光刻	4	12	16
6	第六章 热氧化	2	0	2
7	第七章 扩散掺杂	2	0	2
8	第八章 离子注入掺杂	2	0	2

9	第九章 薄膜淀积	2	0	2
10	第十章 刻蚀	2	0	2
11	第十一章 后段工艺与集成	4	12	16
总计		24	24	48

## 四、教学内容及要求

### (一) 理论教学

#### 第一章 绪论 (1 学时)

1. 教学目标：通过本章节的学习，使学生建立必要的基本概念，掌握 ITRS，集成电路基本器件，CMOS，BJT，硅半导体晶体管，平面工艺基本光刻步骤，BiCMOS，芯片制造过程，前端工序，后段工艺

#### 2. 教学内容

##### 第一节 微电子学的发展 (第一, 二, 三节, 1 学时)

知识点：微电子学，微型电子学，纳米时代的微电子器件，分立器件时代，集成电路时代，电子管计算机，晶体管计算，集成电路计算机，大规模集成电路计算机，微电子技术发展的驱动力，摩尔定律，ITRS，技术结点，特征尺寸，器件尺寸缩小，缩小与技术创新

##### 第二节 工艺技术在学科发展中的作用

知识点：集成电路基本器件，CMOS，BJT，生长晶体管，合金晶体管，双扩散台面晶体管，硅半导体晶体管，平面工艺基本光刻步骤，E/D NMOS，BiCMOS，现代 CMOS 集成电路剖面图

##### 第三节 课程学习的主要内容

知识点：芯片制造过程，前端工序，二氧化硅层制备，光刻，刻蚀，膜层制备&图形转移，掺杂（扩散和离子注入），金属化/互连，后段工艺（切割，封装，测试等）

#### 3. 重点及难点

重点：微电子学的发展，工艺技术在学科发展中的作用，课程学习的主要内容

难点：芯片制造过程，前端工序，后段工艺

4. 教学方式：以讲授为主，启发和讨论为辅。

#### 第二章 现代 CMOS 工艺技术 (1 学时)

1. 教学目标：通过本章节的学习，使学生建立必要的基本概念，掌握 CMOS 工艺流程，光刻、刻蚀，场氧化，埋层和外延层，硅热氧化工艺模型，扩散和离子注入模型

#### 2. 教学内容

##### 第一节 现代 CMOS 工艺技术 (1 学时)

知识点：CMOS 工艺流程，光刻、刻蚀，场氧化，浅槽隔离 (STI)，STI 隔离，氧化物

填充, STI 平坦化, P 阱制备, N 阱制备, N 和 P 阱扩散推进 (drive-in), 制备有源区和阱区的可选工艺方案, 埋层和外延层, 源漏区形成, 接触与局部互连形成, 多层金属互连形成, 多层金属布线, 硅热氧化工艺模型, 扩散和离子注入模型, 工艺模拟的简单流程

### 3. 重点及难点

重点: CMOS 工艺流程, 光刻、刻蚀, 场氧化, 制备有源区和阱区的可选工艺方案, 埋层和外延层, 硅热氧化工艺模型, 扩散和离子注入模型, 工艺模拟

难点: 埋层和外延层, 硅热氧化工艺模型, 扩散和离子注入模型

4. 教学方式: 以讲授为主, 启发和讨论为辅。

## 第三章 晶体生长与衬底制备 (2 学时)

1. 教学目标: 通过本章节的学习, 使学生建立必要的基本概念, 掌握衬底材料, 单晶生长, 衬底制备, 晶体特性, 晶体参数测量

### 2. 教学内容

#### 第一节 衬底材料 (第一, 二节, 1 学时)

知识点: 微电子器件衬底材料的种类, Si 的基本特性, Ge 的基本特性, 硅的晶体

#### 第二节 单晶生长

知识点: 电动势硅砂 (SiO<sub>2</sub>), 冶金级硅 (MGS), 电子级硅 (EGS), 直拉 (Czochralski, CZ) 法, 拉晶过程, CZ 晶体生长模型, 掺杂分布, 平衡分凝系数对晶体杂质分布的影响, 有效分凝系数, 直拉法生长单晶的特点, 区熔 (float-zone) 法, 区熔法生长单晶的特点, 硅片尺寸的变化趋势, 硅片厚度的变化趋势, GaAs 单晶生长, Bridgman 法

#### 第三节 衬底制备 (第三, 四, 五节, 1 学时)

知识点: 传统硅片加工工艺流程, 整形之 1 (切断, 外径滚磨, 定位面研磨), 晶体定向和晶面标识, 整形之 2 (切片, 倒角, 研磨, 腐蚀, 抛光, 清洗)

#### 第四节 晶体特性

知识点: 理想晶体, 实际晶体, 缺陷, 缺陷分类, 缺陷几何形态, 点缺陷, 线缺陷, 产生位错的原因, 位错运动机制, 面缺陷, 体缺陷, 缺陷的存在

#### 第五节 晶体参数测量

知识点: 电学测量, 导电类型测量, 电阻率测量, 霍尔效应测量, 物理测量, 傅里叶变换红外光谱 (FTIR), 电子显微镜 (SEM & TEM), 缺陷的腐蚀, 新型衬底, SOI (silicon on insulator) 衬底

### 3. 重点及难点

重点: 衬底材料, 单晶生长, 衬底制备, 晶体特性, 晶体参数测量

难点: 单晶生长, 衬底制备, 晶体参数测量

4. 教学方式: 以讲授为主, 启发和讨论为辅。

## 第四章 加工环境与基片清洗（2 学时）

1. 教学目标：通过本章节的学习，使学生建立必要的基本概念，掌握环境净化，硅片清洗，吸杂，测量方法

### 2. 教学内容

#### 第一节 概述（第一，二节，1 学时）

知识点：影响成品率的因素，器件总成品率，工艺成熟性，工艺步骤数，硅片直径，芯片尺寸，成品率模型，缺陷密度，微粒，金属离子，金属离子的危害，化学物质，如何控制污染、降低缺陷密度

#### 第二节 环境净化

知识点：环境，空气，ISO, FS209E 洁净度等级对照，洁净室及洁净区空气中悬浮粒子洁净度等级，洁净室，空气净化方法，传统洁净室的问题，洁净室人员，简单的洁净室操作规程，硅片隔离技术，微环境系统与传统洁净室的比较，设备，水，气体及化学试剂，典型工艺用特殊气体，微电子工艺用化学品

#### 第三节 硅片清洗（第三，四，五节，1 学时）

知识点：硅片清洗的目的，湿法化学清洗、干法化学清洗和物理清洗的清洗思路与清洗方式，传统 RCA 清洗法的清洗流程，未来的清洗技术

#### 第四节 吸杂

知识点：碱金属离子的吸杂，其他深能级金属离子的吸杂，深能级金属离子的基本特点，本征吸杂，吸杂三步骤基本原理，其它方法解释捕获过程的机理

#### 第五节 测量方法

知识点：无图形硅片，有图形硅片，每步每片上的颗粒数（PWP），清洗后杂质、污染物浓度，金属原子浓度低，直接测量较困难，MOS 电容-电压（CV）测量，开路电压衰减（Open Circuit Voltage Decay）测量

### 3. 重点及难点

重点：环境净化，硅片清洗，吸杂，测量方法

难点：硅片清洗，吸杂

4. 教学方式：以讲授为主，启发和讨论为辅。

## 第五章 光刻（4 学时）

1. 教学目标：通过本章节的学习，使学生建立必要的基本概念，掌握光刻工艺过程，光刻胶，正胶，负胶，DUV 胶化学增强基本原理

### 2. 教学内容

#### 第一节 概述（第一，二节，2 学时）

知识点：图形转移，光刻

## 第二节 基本概念

知识点：光刻工艺过程，光刻系统组成，空间图像，潜在图像，光刻胶（photoresist），正胶（positive photoresist, DNQ），负胶（Negative Optical Photoresist），光刻胶的性能参数，光刻胶对比度，曝光均匀性问题，驻波（Standing Wave）效应，深紫外（DUV）光刻胶，DUV 胶化学增强基本原理，光刻掩模版，掩模版制作过程，曝光系统，评价光学曝光系统的指标，接触式曝光系统，投影式曝光系统，尺寸控制&缺陷修复容易，远场夫琅和费衍射，高 NA 透镜具较小焦深（Depth of focus）

## 第三节 光刻工艺流程（第三，四，五节，2 学时）

知识点：衬底准备，涂胶，涂胶常见问题，前烘，曝光，标准对准标记，双面曝光对准原理，自动对准系统，显影，坚膜，去胶，用于图形转移的剥离（lift-off）工艺，TMR 传感器膜层结构

## 第四节 光学光刻的局限和分辨率增强技术

知识点：光学曝光系统发展目标，分辨率增强技术（RET），光学邻近效应校正（OPC）原理，OPC 基本方法，离轴照明（OAI）原理，相移掩模（PSM）原理，浸入式光刻（Immersion lithography）

## 第五节 非光学曝光技术

知识点：理想光刻要求，电子束曝光，投影电子束，电子束曝光中的邻近效应，离子束曝光，X 射线曝光（XRL），极/超紫外光曝光（EUV），纳米压印光刻（NIL），NIL 在大尺寸硅片上应用实例

### 3.重点及难点

重点：基本概念，光刻工艺流程，光学光刻的局限和分辨率增强技术

难点：光刻工艺流程

4. 教学方式：以讲授为主，启发和讨论为辅。

## 第六章 热氧化（2 学时）

1. 教学目标：通过本章节的学习，使学生建立必要的基本概念，掌握二氧化硅的结构和性质，热氧化过程，热氧化生长动力学，Deal-Grove（D-G）氧化动力学模型，二氧化硅的掩模特性，Si/SiO<sub>2</sub> 界面特性，氧化质量分析。

### 2. 教学内容

#### 第一节 二氧化硅的结构和性质（第一，二节，1 学时）

知识点：结晶形 SiO<sub>2</sub>，无定形 SiO<sub>2</sub>，二氧化硅的主要性质，二氧化硅的主要作用，MOS 器件的绝缘栅介质，选择性掺杂的掩蔽，器件隔离，多层互连的层间绝缘介质（ILD / IMD），缓冲层 / 垫氧化层

#### 第二节 热氧化过程

知识点：半导体材料氧化，热氧化分类，热氧化基本装置，用于热工艺的基本设备，热氧化的基本过程，氧化过程中的杂质再分布

### 第三节 热氧化生长动力学（第三，四，五，六节，1学时）

知识点：氧化动力学模型，Deal-Grove (D-G) 氧化动力学模型，影响氧化速率的因素，二氧化硅的厚度与反应时间、反应温度的关系，晶向，杂质，氯对氧化速率的影响，B/A 及 B 和工艺参数的关系，薄氧化层生长动力学模型，二维氧化生长动力学模型

### 第四节 二氧化硅的掩模特性

知识点：选择性扩散的掩蔽

### 第五节 Si/SiO<sub>2</sub> 界面特性

知识点：界面势阱电荷  $Q_{it}$ ，氧化层固定电荷  $Q_f$ ，氧化层可移动电荷  $Q_m$ ，氧化层势阱电荷  $Q_{ot}$ 。

### 第六节 第六节氧化质量分析

知识点：物理测量，光学测量，干涉法 (interference)，椭圆偏光法 (ellipsometry)，电学测量

## 3.重点及难点

重点：热氧化过程，热氧化生长动力学，Si/SiO<sub>2</sub> 界面特性，氧化质量分析

难点：Deal-Grove (D-G) 氧化动力学模型，干涉法，椭圆偏光法

4. 教学方式：以讲授为主，启发和讨论为辅。

## 第七章 扩散掺杂 (2学时)

1. 教学目标：通过本章节的学习，使学生建立必要的基本概念，掌握扩散工艺，扩散机制，扩散系数与扩散方程，费克定律的分析解，非本征扩散，扩散层质量分析

### 2. 教学内容

#### 第一节 扩散工艺（第一，二，三节，1学时）

知识点：扩散过程，气态源扩散，液态源扩散，固态源扩散，完成扩散过程的八个步骤

#### 第二节 扩散机制

知识点：填隙式扩散，替位式扩散，扩散机率

#### 第三节 第三节扩散系数与扩散方程

知识点：费克 (Fick) 第一定律，扩散系数，费克 (Fick) 第二定律

#### 第四节 费克定律的分析解（第四，五，六，七节，1学时）

知识点：恒定源 (Constant Source) 扩散，余误差函数分布，有限源 (limited Source) 扩散，多步退火 (推进) 过程 (Multiple drive-in process)，扩散层的设计和估算

#### 第五节 非本征扩散

知识点：非本征扩散系数，电场效应，氧化增强/抑制扩散 (oxidation enhanced / retarded

diffusion) OED/ORD, 非本征扩散分布, 硅中的扩散, 常用杂质硼 (B), 磷 (P), 砷 (As) 在硅中的性质, 砷化镓中的扩散, 横向扩散

#### 第六节 扩散层质量分析

知识点: 结深测量, 薄层电阻测量, 四探针测量法, 范德堡测量法, 杂质分布测量, 电容-电压法 (C-V 法), 扩展电阻法, 热波法, TEM 截面法, 扫描隧道显微法, 二次离子质谱

#### 第七节 扩散方法的局限和发展

知识点: 扩散方法的局限, 扩散工艺的发展, 快速气相掺杂, 气体浸没激光掺杂

### 3.重点及难点

重点: 扩散机制, 扩散系数与扩散方程, 费克定律的分析解, 非本征扩散, 扩散层质量分析

难点: 扩散系数与扩散方程, 费克定律的分析解, 非本征扩散

4. 教学方式: 以讲授为主, 启发和讨论为辅。

## 第八章 离子注入掺杂 (2 学时)

1. 教学目标: 通过本章节的学习, 使学生建立必要的基本概念, 掌握离子注入的基本过程, 离子注入系统, 离子注入原理, 注入离子在靶中的浓度分布, 注入损伤和退火, 注入工艺

### 2. 教学内容

#### 第一节 概述 (第一, 二, 三节, 1 学时)

知识点: 离子注入的基本过程, 离子注入优缺点, 控制杂质浓度和深度

#### 第二节 离子注入系统

知识点: 离子源, 离子发生器, 质量分析器, 加速器, 剂量与能量图, 终端台, 聚焦系统, 扫描系统, 靶室, 中和系统, 终端分析

#### 第三节 离子注入原理

知识点: 射程分布 (Lindhard, Scharff and Schiott, LSS) 理论, 阻滞能力, 核阻滞, 电子阻滞, 射程估算

#### 第四节 注入离子在靶中的浓度分布 (第四, 五, 六, 七节, 1 学时)

知识点: 纵向分布, 注入离子的真实分布, 横向效应, 离子沟道效应, 浅结的形成

#### 第五节 注入损伤和退火

知识点: 注入损伤, 简单晶格损伤, 非晶的形成 (Amorphization), 退火 (Annealing), 损伤恢复机制, 普通热退火, 快速退火 (RTA)

#### 第六节 注入工艺

知识点: 多次注入及掩蔽, 掩蔽层注入, 倾斜角度离子注入, 高能量与大电流注入, 注

## 氧隔离 (Seperation by Implanted Oxygen, SIMOX)

### 第七节 离子注入层特性的测量和分析

知识点: 电学特性测量, 杂质浓度分布测量, 注入层损伤的观测

#### 3.重点及难点

重点: 离子注入系统, 离子注入原理, 注入离子在靶中的浓度分布, 注入损伤和退火, 注入工艺

难点: 离子注入原理, 注入离子在靶中的浓度分布, 注入损伤和退火

4.教学方式: 以讲授为主, 启发和讨论为辅。

## 第九章 薄膜淀积 (2 学时)

教学目标: 通过本章节的学习, 使学生建立必要的基本概念, 掌握化学气相淀积, 外延, 物理气相淀积

### 2. 教学内容

#### 第一节 概述 (第一, 二, 三, 四节, 1 学时)

知识点: 薄膜质量, 厚度均匀性, 淀积膜的台阶覆盖 (step coverage)

#### 第二节 化学气相淀积

知识点: 化学气相淀积的基本过程, 化学气相淀积系统, APCVD 系统, LPCVD 系统, 二氧化硅的化学气相淀积, 多晶硅的化学气相淀积, 氮化硅的化学气相淀积, 金属的化学气相淀积

#### 第三节 外延

知识点: 硅气相外延, 外延生长, 外延掺杂, 选择外延, SOS 外延, 金属有机物化学气相淀积, 分子束外延

#### 第四节 物理气相淀积

知识点: 真空蒸发, 常用真空蒸发系统, 电阻式蒸发, 电子束蒸发, 电感式蒸发, 激光蒸发, 溅射, 溅射过程, 溅射的六个阶段, 溅射特性, 常用溅射方法, 直流溅射, 射频溅射, 磁控溅射, 反应溅射, 准直溅射

#### 3.重点及难点

重点: 化学气相淀积, 外延, 物理气相淀积

难点: 化学气相淀积, 外延

4. 教学方式: 以讲授为主, 启发和讨论为辅。

## 第十章 刻蚀 (2 学时)

1. 教学目标: 通过本章节的学习, 使学生建立必要的基本概念, 掌握刻蚀过程三个基本阶段, 湿法化学刻蚀, 干法刻蚀, 等离子体刻蚀, 溅射刻蚀



## 2. 教学内容

### 第一节 概述（第一，二，三节，1 学时）

知识点：刻蚀品质因素，刻蚀要求，湿法刻蚀，干法刻蚀

### 第二节 湿法化学刻蚀

知识点：刻蚀过程三个基本阶段，硅的刻蚀，二氧化硅的刻蚀，氮化硅的刻蚀

### 第三节 干法刻蚀

知识点：常用干法刻蚀系统，等离子体刻蚀（Plasma Etching），溅射刻蚀（Ion Beam Etching, IBE），反应离子刻蚀（Reactive Ion Etching, RIE），刻蚀方向性的选择，热流传感器，高密度等离子体刻蚀（HDP Etching），干法刻蚀的应用，电介质的干法刻蚀

## 3.重点及难点

重点：湿法化学刻蚀，干法刻蚀

难点：湿法化学刻蚀，干法刻蚀

4. 教学方式：以讲授为主，启发和讨论为辅。

## 第十一章 后段工艺与集成（4 学时）

1. 教学目标：通过本章节的学习，使学生建立必要的基本概念，掌握隔离与互连，工艺集成，平坦化工艺，CMOS 工艺，BiCMOS 工艺

## 2. 教学内容

### 第一节 隔离与互连（第一节，2 学时）

知识点：MOS 隔离技术，现代 STI 技术（CMOS），绝缘体上硅隔离，金属化/互连，平坦化工艺

### 第二节 工艺集成（第二节，2 学时）

知识点：MOS 电容，p-n 结电容，CMOS 工艺，CMOS 工艺中的基本模块，双极型工艺，BiCMOS 工艺

## 3.重点及难点

重点：隔离与互连，工艺集成

难点：平坦化工艺，CMOS 工艺，BiCMOS 工艺

4.教学方式：以讲授为主，启发和讨论为辅。

## （二）实验教学

### 实验一 光刻

（综合性实验 12 学时）

#### 1. 目的要求

通过本实验的学习，使学生建立必要的基本概念，掌握光刻工艺流程。包括环境配置，硅片清洗，光刻胶旋胶，光刻等核心工艺流程。

#### 2. 实验内容

- (1) 光刻胶制备：表面处理，旋涂光刻胶，前烘
  - (2) 光刻工艺集成：显影，光刻，刻蚀，显微镜检查
3. 主要仪器设备及用品  
集成电路软件平台

## 实验二 气相沉积

(综合性实验 12 学时)

1. 教学目标:通过本实验的学习,使学生建立必要的基本概念,掌握气相沉积工艺流程。包括气态原材料分解,扩散,催化,原子反应,气相沉积等核心工艺流程。

2. 实验内容

- (1) 薄膜气象制备：表面处理，酸性清洗
- (2) 薄膜气象沉积工艺： 氧化反应，结晶，薄膜生长，显微镜检查，

3. 主要仪器设备及用品  
集成电路软件平台

### (三) 课程思政教学

序号	模块名称	教学内容结合点	思政元素
1	模块一 绪论微电子工艺基本概念	我国微电子工艺从无到有的艰难起步与发展历程(如早期对国外技术的学习与自主探索阶段)	艰苦奋斗精神与民族使命感
2	模块二 CMOS 现代工艺	国内企业在 CMOS 工艺技术上打破国外垄断的突破(如中芯国际在先进 CMOS 工艺上的研发成果)	自主创新意识与科技自强信念
3	模块四 加工环境与基片清洗	科研人员在优化加工环境和基片清洗技术过程中的坚守与创新(如在提升芯片良品率上的努力)	科学严谨态度与创新精神
4	模块六 光刻	中国光刻技术在重重困难下的追赶与进步(如上海微电子在光刻技术研发中的不懈努力)	坚韧不拔意志与科技强国决心

## 五、考核方式及成绩评定

### 1. 考核方式

本课程考核包括平时考查和期末考试两个部分。平时考查针对学生学习过程评价，包括考勤、作业、课堂表现方面。期末考试采用闭卷笔试形式，以考查学生对基本概念、基本知识的理解与掌握。

### 2. 成绩评定

本课程由平时考查成绩(40%)和期末考试成绩(60%)两个部分按百分制综合评定成绩，其中平时考查成绩包括课堂表现(30%)、作业(30%)、上机实验(40%)三个方面。

课程目标考核权值分配

课程目标	考核方式及占比				合计
	课堂表现	作业	上机实验	期末考试	
课程目标 1	6	4		20	30
课程目标 2		4	8	20	32
课程目标 3		4	8	20	32
课程目标 4	6				6
分值	12	12	16	60	100

## 八、推荐教材及参考资料

### 1. 推荐教材

王蔚.集成电路制造技术——原理与工艺.北京：电子工业出版社，2016.

### 2. 参考资料

[1] S. A. Campbell.微纳尺度制造与工程（第三版）.北京：电子工业出版社，2019.

[2] M. Quirk.半导体制造技术.北京：电子工业出版社，2019.

[3]J. D. Plummer.硅超大规模集成电路工艺技术：理论、实践与模型.北京：电子工业出版社，2019.

编写人：金侃

审核人：邢月明

制定时间：2024年12月31日