

微电子工艺原理与应用虚拟仿真实验内容

集成电路（IC）是现代科技的基石，其制造过程堪称人类工业文明的巅峰之作。它是在一片小小的硅片上，通过数百道精密复杂的工序，将数十亿乃至上百亿个晶体管互连而成的宏大系统工程。在这个复杂的过程中，光刻（Photolithography）和 等离子体增强化学气相沉积（PECVD）是两大不可或缺的核心工艺。前者如同芯片的“画笔”，精确界定电路的微观图形；后者则如同芯片的“裁缝”，为器件生长出各种功能的薄膜“外衣”。传统的 IC 制造教学受限于高昂的设备成本、严苛的超净环境以及不可逆的操作风险，而基于 iLab-X 集成电路制造虚拟仿真教学平台的出现，完美地打破了这些壁垒，使得学生能够在虚拟环境中安全、低成本、高效率地深入理解和掌握这两大关键工艺。

实验一：光刻工艺——绘制芯片蓝图的精密艺术

光刻是 IC 制造中最关键、最复杂、成本最高的工艺步骤，其基本目标是将掩模版（Mask）上的设计图形精确地复制到涂覆在硅片表面的光刻胶上。其分辨率直接决定了芯片的特征尺寸和集成度。



图 1 光刻工艺虚拟仿真实验 1



图 2 光刻工艺虚拟仿真实验 2

一套完整的光刻流程通常包含以下十个核心步骤，在 iLab-X 虚拟仿真平台中，每一步都通过高精度 3D 建模和物理引擎模拟得以重现，学生可以一步步进行操作和观察。

表面准备与增粘处理（Surface Preparation & Priming）：

目的：确保硅片表面洁净、干燥，并增强光刻胶与硅片表面的粘附性，防止在后续显影、刻蚀过程中图形脱落。

工艺：通常先进行脱水烘焙（Dehydration Bake）以去除表面水分，然后通过旋涂（Spin Coating）方式涂覆一层六甲基二硅氮烷（HMDS）增粘剂。HMDS 是一种耦合剂，能在硅片表面形成疏水层，有效提高光刻胶的附着力。

iLab-X 仿真重点：在虚拟平台上，学生需要设置烘烤的温度和时间，并操作旋涂机设定 HMDS 的涂覆转速，观察成膜均匀性的变化。

旋涂光刻胶（Photoresist Spin Coating）：

目的：在硅片表面均匀涂覆一层厚度精确、无缺陷的光刻胶薄膜。光刻胶分为正胶（Positive Resist）和负胶（Negative Resist），正胶曝光部分在显影时被溶解，负胶则相反。

工艺：将硅片固定在真空吸盘上，滴上液态光刻胶，然后高速旋转。通过离心力使光刻胶铺展均匀，并通过溶剂挥发形成固态薄膜。膜厚由光刻胶粘度和旋转速度决定，遵循 $\text{厚度} \propto 1/\sqrt{\text{转速}}$ 的关系。

iLab-X 仿真重点：学生可交互式调整转速、加速度和时间等参数，仿真系统会实时计算并显示最终的胶厚和均匀性，直观理解工艺参数与结果的关系。

软烘（Soft Bake / Pre-Bake）：

目的：蒸发掉光刻胶中的大部分溶剂，提高胶膜的机械稳定性；同时固化胶膜，使其在后续处理中不易被损坏；还能增强光敏化合物（PAC）与树脂的耦合。

工艺：通常在热板（Hotplate）或烘箱（Oven）中进行，温度和时间需精确控制。过度烘焙会导致光敏剂失效，不足则会导致溶剂残留过多。

iLab-X 仿真重点：虚拟平台会模拟烘焙过程，并允许学生通过改变温度和时间，观察对后续曝光灵敏度（曝光能量窗口）的影响。

对准与曝光（Alignment and Exposure）：

目的：这是光刻的核心。通过曝光系统，将掩模版上的图形通过光学系统投影到光刻胶上，引发光刻胶的光化学反应。

工艺：

对准（Alignment）：精确移动掩模版和硅片，使当前层的图形与之前已有图形层严格套准（Overlay）。套准精度是衡量光刻机性能的关键指标之一。

曝光（Exposure）：使用特定波长的光源（如 g-line 436nm, i-line 365nm, KrF 248nm, ArF 193nm, EUV 13.5nm）照射光刻胶。发生光化学反应的光刻胶区域其溶解性发生改变。

iLab-X 仿真重点：这是虚拟仿真的精髓。学生可以操作虚拟光刻机，进行手动或自动对准，观察套刻误差（Overlay Error）的测量。在曝光环节，可以选择不同的光源波长（如 i-line, KrF）、数值孔径（NA）、相干因子（ σ ）等，系统会基于光学模型模拟出最终在光刻胶上形成的光强分布图像，甚至预测出图形的分辨率、焦深（DOF）等，深刻理解瑞利判据（ $\text{Resolution} = k_1 \cdot \lambda / \text{NA}$ ）的含义。

曝光后烘烤（Post-Exposure Bake, PEB）：

目的：主要用于化学放大光刻胶（CAR, Chemical Amplified Resist）。通过加热促进曝光区域产生的酸催化剂发生扩散并引发链式反应，从而“放大”曝光效果，提高光刻灵敏度。

工艺：在热板上进行精确的温度控制。PEB 的温度和时间对关键尺寸（CD）控制至关重要。

iLab-X 仿真重点：仿真平台可以模拟酸扩散过程，展示不同 PEB 条件对最终图形线宽（CD）和侧壁形貌的影响。

显影（Development）：

目的：使用显影液溶解掉可溶区域的光刻胶（对正胶是曝光区，对负胶是未曝光区），从而将掩模版上的图形真实地转移到光刻胶上。

工艺：通常采用浸泡（Immersion）、喷淋（Spray）或旋覆浸没（Puddle）方式。显影时间、浓度和温度必须严格控制。

iLab-X 仿真重点：学生选择显影方式和时间后，虚拟系统会动态模拟光刻胶的溶解过程，最终显示出三维的光刻胶图形，并可进行尺寸测量，检查是否出现显影不足（Incomplete Development）、过显影（Over Development）等缺陷。

硬烘（Hard Bake）：

目的：进一步去除光刻胶中残留的溶剂，提高光刻胶的抗刻蚀性和离子注入的阻挡能力，使其能更好地在后续工艺中充当屏障。

工艺：比软烘温度更高。但过高的温度会导致光刻胶流动，使图形变形。

iLab-X 仿真重点：模拟烘烤后图形关键尺寸的变化，让学生理解热流动（Thermal Flow）对图形保真度的影响。

图形检测（Pattern Inspection）：

目的：检查光刻后的图形质量，包括关键尺寸（CD）、套刻误差（Overlay）、缺陷（Defect）等。

工艺：使用扫描电子显微镜（CD-SEM）测量线宽，使用光学 overlay 量测机测量套刻误差。

iLab-X 仿真重点：虚拟平台集成了 CD-SEM 和 Overlay 量测机的模拟功能，学生可以操作虚拟测量设备对自己“制造”出的图形进行检测，并获得测量报告，判断该片晶圆是否合格。

刻蚀或离子注入（Etch or Ion Implantation）：

目的：以光刻胶为掩模，对下层材料进行选择刻蚀或将杂质离子注入硅片特定区域。

工艺：刻蚀（干法或湿法）去除未被光刻胶保护的材料；离子注入将掺杂原子打入暴露的硅区域。

iLab-X 仿真重点：虽然这不是光刻本身，但虚拟平台会连贯地模拟以光刻胶为掩模的刻蚀或注入过程，让学生完整看到图形如何从胶层转移到功能层。

光刻胶去除（Photoresist Stripping）：

目的：在完成图形转移使命后，彻底清除硅片上的光刻胶及其残留物。

工艺：采用湿法化学（如硫酸/过氧化氢混合液）或干法等离子体灰化（Ashing）。

iLab-X 仿真重点：模拟去胶过程，并检查去胶后表面是否洁净，为下一道工序做准备。

通过 iLab-X 平台的虚拟光刻模块，学生可以在短时间内重复完

成整个流程，系统性研究每个参数（如转速、烘烤温度、曝光能量、焦距、显影时间）对最终图形质量的影响，这是任何真实实验环境都无法比拟的教学优势。

实验二：PECVD 工艺——低温生长多功能薄膜的关键技术

在 IC 制造中，需要在硅片表面沉积各种不同材料的薄膜，如绝缘层、钝化层、牺牲层等。化学气相沉积（CVD）是主要技术，而等离子体增强化学气相沉积（PECVD）因其独特的优势成为最常用的 CVD 技术之一。

一、PECVD 原理与优势

原理：PECVD 利用等离子体（部分电离的气体，包含离子、电子、活性基团）来激活化学反应。在真空反应腔内，通入反应气体，通过射频（RF）电源激发产生等离子体。等离子体中的高能电子撞击反应气体分子，使其分解或激发产生大量高活性的化学基团（Radicals）。这些活性基团在相对低温的硅片表面发生化学反应，生成固态薄膜并副产挥发性气体，被真空系统抽走。

对比传统 CVD（如 APCVD, LPCVD）的优势：

低温工艺：传统热 CVD 需要 800-1200° C 的高温，而 PECVD 通常在 250-400° C 即可完成沉积。这对已经含有金属互连层的后端（BEOL）工艺至关重要，避免了金属熔化或性能退化。

沉积速率高：等离子体提供了大量反应能量，因此沉积速率通常较快。

薄膜质量好：可以制备出台阶覆盖性（Step Coverage）好、内应力可控、致密度高的薄膜。

材料多样性：可以沉积二氧化硅（SiO₂）、氮化硅（Si₃N₄）、氮氧化硅（SiON）、非晶硅（a-Si）等多种材料。

二、PECVD 系统核心组件（iLab-X 虚拟仿真中的设备拆解）

在 iLab-X 平台中，学生可以进入虚拟的 PECVD 设备内部，了解其核心组成部分：

反应腔（Chamber）：真空密封的金属腔体，是所有反应发生的

地方。

气体输送系统 (Gas Delivery System)：包括气源 (如 SiH_4 , N_2O , NH_3 , N_2)、质量流量控制器 (MFC) 和管道，精确控制各种反应气体的流量和比例。

真空系统 (Vacuum System)：由机械泵和分子泵 (Turbo Pump) 组成，用于将反应腔抽至并维持所需的本底真空 (通常 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Torr)，避免杂质污染。

射频电源 (RF Power Supply)：通常为 13.56MHz 的射频源，通过匹配网络 (Matching Network) 和电极 (Electrode) 施加到反应腔，用于激发和维持等离子体。匹配网络的作用是最大化功率传输到等离子体，并保护电源。

基座 (Heater Pedestal)：用于承载并加热硅片，温度可精确控制。

压力控制系统 (Pressure Controller)：通过调节节流阀 (Throttle Valve) 的开度，控制反应腔内的工艺压力。

三、PECVD 工艺流程与虚拟仿真



图 3 PECVD 工艺虚拟仿真实验 3

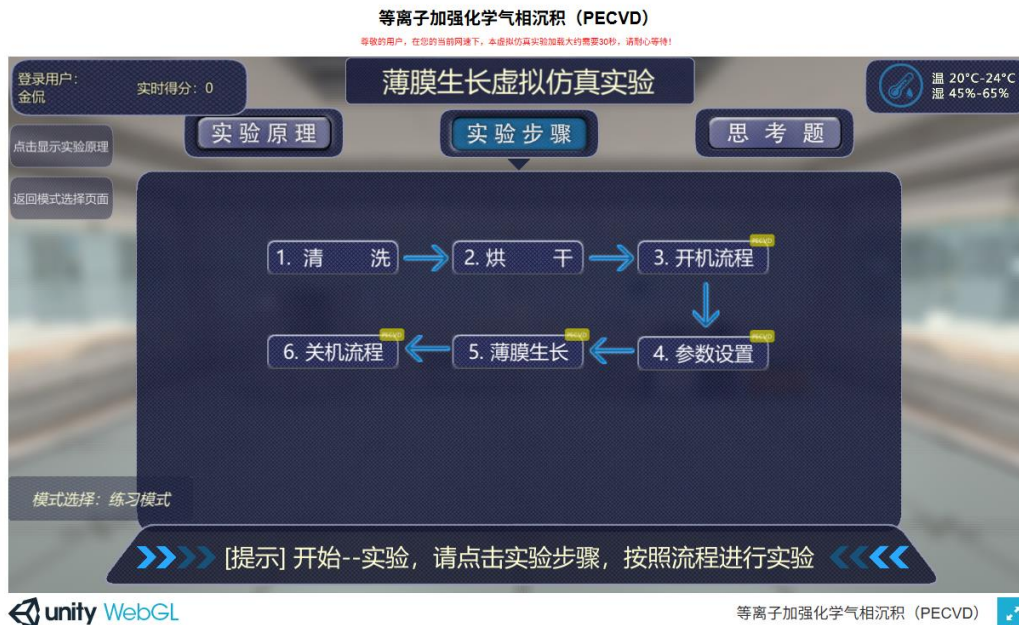


图 4 PECVD 工艺虚拟仿真实验 2

在 iLab-X 中完成一次 PECVD 工艺仿真通常包含以下步骤：

工艺配方选择与参数设置：学生首先需要选择要沉积的薄膜类型（如 SiO_2 或 SiN ）。系统会给出默认的工艺参数，但学生可以并鼓励他们进行修改，以探究参数影响。关键参数包括：

反应气体流量比：如沉积 SiO_2 常用 $\text{SiH}_4 + \text{N}_2\text{O}$ ，改变 $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 的比率会显著影响薄膜的折射率（Refractive Index）和应力（Stress）。

射频功率（RF Power）：功率影响等离子体密度和活性基团浓度，进而影响沉积速率和薄膜质量（如致密度、应力）。

工艺压力（Process Pressure）：压力影响气体分子的平均自由程，从而影响薄膜的台阶覆盖能力和均匀性。

基座温度（Substrate Temperature）：温度影响表面反应速率和吸附分子的迁移率，对薄膜质量和应力有关键作用。

沉积时间（Deposition Time）：直接控制薄膜的最终厚度。

硅片传输与腔室准备：在虚拟平台上，学生操作机械手将硅片从

传送腔 (Loadlock) 传送到反应腔内，并放置在加热基座上。

抽真空：启动真空泵序列，将反应腔抽至高真空，确保环境洁净。

工艺气体通入与稳定：按照设定好的流量，向腔室内通入反应气体和惰性载气（如 Ar），并通过节流阀调节至目标工艺压力。

等离子体激发与沉积：开启射频电源，观察虚拟界面中等离子体辉光 (Glow Discharge) 的产生。沉积过程开始，系统会模拟薄膜随时间生长的动画。

工艺结束与腔室清洗：到达设定时间后，依次关闭 RF 电源、停止通入反应气体。通常需要通入清洗气体（如 NF_3 , C_2F_6 ）产生等离子体来清洗腔室内壁的沉积物，为下一次运行做准备。

取片与薄膜测量：工艺完成后，将硅片传出。学生可以使用虚拟的膜厚测量仪（如椭圆偏振仪 Ellipsometer）测量沉积薄膜的厚度和折射率，并使用应力仪测量薄膜应力。

通过反复调整参数并观察结果，学生可以深刻理解 PECVD 工艺参数与薄膜性能（厚度、均匀性、折射率、应力）之间的复杂关系，掌握工艺优化的基本方法。