

薄膜淀积实验

实验简介

薄膜的沉积方法根据其用途的不同而不同。薄膜厚度通常小于 1 μm ，有绝缘膜、半导体薄膜、金属薄膜等各种各样的薄膜。薄膜的沉积法主要有利用化学反应的 CVD(chemical vapor deposition)法以及物理现象的 PVD(physical vapor deposition)法两大类。CVD 法有外延生长法、HCVD、PECVD 等。PVD 有溅射法和真空蒸发法。一般而言，PVD 温度低，没有毒气问题；CVD 温度高，需达到 1000 $^{\circ}\text{C}$ 以上将气体解离，来产生化学作用。PVD 沉积到材料表面的附着力较 CVD 差一些，PVD 适用于在光电产业，半导体制程中的金属导电膜大多使用 PVD 来沉积，而其他绝缘膜则大多采用要求较严谨的 CVD 技术。以 PVD 被覆硬质薄膜具有高强度、耐腐蚀等特点。

实验原理

采用 CVD 技术淀积的薄膜，按电性能可分为半导体膜、绝缘体膜和导体膜,CVD 技术分类如图 8-1 所示。

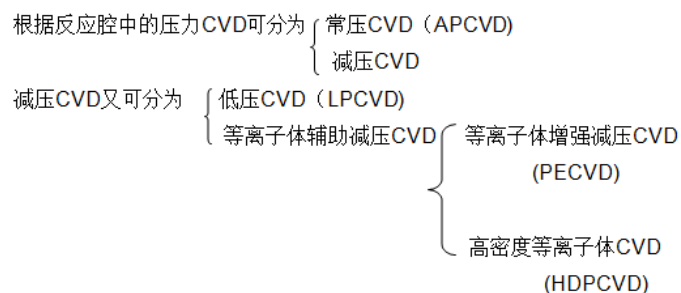


图 8-1 CVD 技术分类

外延硅：晶圆被放置在反应室内，硅原子被淀积在裸露的晶圆上，薄膜生长时，形成单晶结构。足够能量的淀积原子到达晶圆表面，并在其表面游动，将自身调整到与晶圆原子的晶体定向相一致。这样，便生长成定向的晶圆外延层。

导体膜：金属薄膜在半导体技术中最一般和最常见用途就是表面连线。把各个元件连接到一起的材料、工艺、连线过程一般称为金属化工艺 (metallization) 或者金属化工艺流程 (metallization process)。常用溅射的方法把隔离金属淀积到连接孔/沟槽中，钽和氮化钽是目前所用的隔离金属材料。

1.溅射镀膜 PVD

溅射是用高速粒子(如氩离子等)撞击固体表面，将固体表面的原子撞击出来，利用这一现象来形成薄膜的技术，即让等离子体中的离子加速，撞击原料靶材，将撞击出的靶材原子淀积到对面的基片表面形成薄膜。

溅射法与真空蒸发法相比有以下的优点：台阶部分的被覆性好，可形成大面积的均质薄膜，形成的薄膜可获得和化合物靶材同一成分的薄膜，可获得绝缘薄膜和高熔点材料的薄膜，形成的薄膜和下层材料具有良好的密接性能。因而，电极和布线用的铝合金(Al-Si,Al-Si-Cu)等都是利用溅射法形成的。最常用的溅射法是在平行平板电极间接上高频(13.56MHz)电源，使氩气(压力为1Pa)离子化，将靶材溅射出来的原子淀积到另一侧电极上的基片上。为提高成膜速度，通常利用磁场来增加离子的密度，这种装

置称为磁控溅射装置(magnetron sputter apparatus)，以高电压将通入的惰性氩体游离，再借由阴极电场加速吸引带正电的离子，撞击在阴极处的靶材，将欲镀物打出后沉积在基板上，PVD 腔体结构如图 8-2 所示。

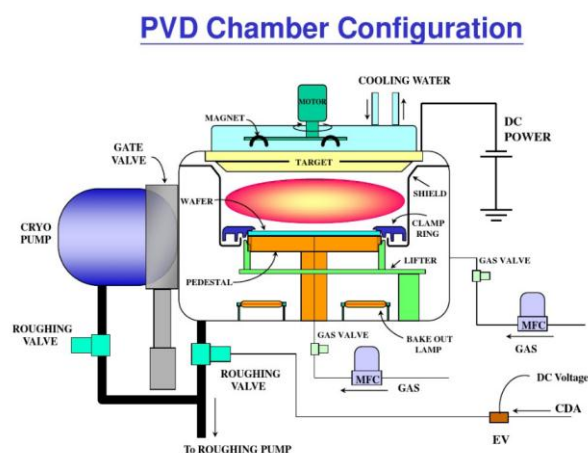


图 8-2 PVD 腔体结构

溅射镀膜的系统常规工作参数(温度，硅烷浓度，抽真空速率，氮气流量，或其他气体流量)都会影响淀积率和成核尺寸，溅射镀膜的系统晶圆处理流程如图 8-3 所示。

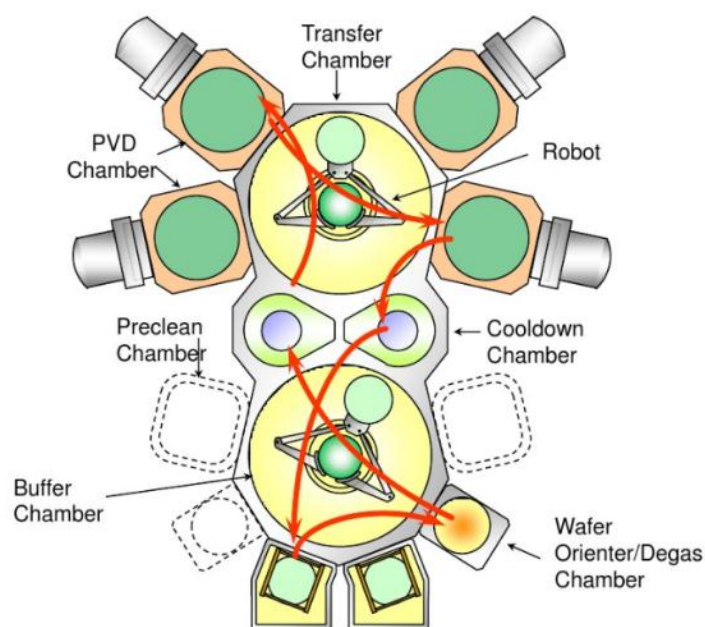


图 8-3 溅射镀膜的系统晶圆处理流程

2. 低压化学气相沉积(LPCVD)

化学气相沉积(chemical vapor deposition)是半导体集成电路制造的重要工序之一，主要用于 Si_3N_4 、 SiO_2 、Poly-Si、PSG、BPSG、非晶硅薄膜的生长。它是将原材料气体(或者液态源气化 TEOS)热能激活发生化学反应而在基片表面生成固体薄膜。低压化学气相沉积是在低压下进行的，由于气压低，气体分子平均自由程大，使生长的薄膜均匀性好，而且基片可以竖放，故装片量大，适合工业化生产。

在晶圆竖放于晶舟已不可避免之情况下，降低化学蒸气之环境压力，是一个解决厚度均匀性的可行之道。原来依定义黏性流特性之雷诺数观察，动力黏滞系数 ν 随降压而变小，如此一来雷诺数激增，而使化学蒸气流动由层流(laminar flow)进入紊流(turbulent flow)。有趣的是紊流不易分离，换言之，其为一乱中有序之流动，故尽管化学蒸气变得稀薄，使沉积速度变慢，但其经过数十片的晶圆后，仍无分离逆流的现象，而保有厚度均匀，甚至质地致密的优点。以 800°C 、1Torr 成长之 LPCVD 氮化硅薄膜而言，其质地极为坚硬耐磨，也极适合蚀刻掩膜之用(沉积速度约 20 分钟 0.1 微米厚)。

LPCVD 有许多优点，它不但不需要造价昂贵、维护复杂的高真空泵，而且提供了稳定的阶梯覆盖度和较高的生产效率，LPCVD 工艺原理如图 8-4 所示。

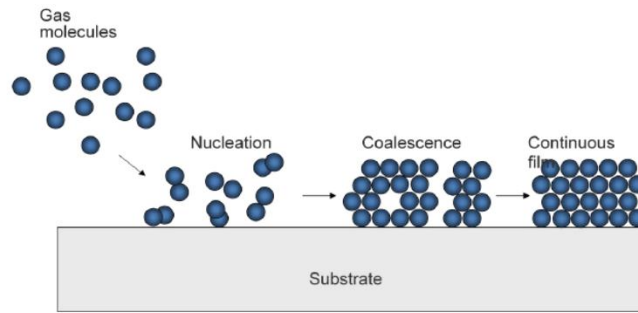


图 8-4 LPCVD 工艺原理

通常 LPCVD 系装置采用扩散炉式结构，只是多了一个真空系统，立式炉管示意图如图 8-5 所示。

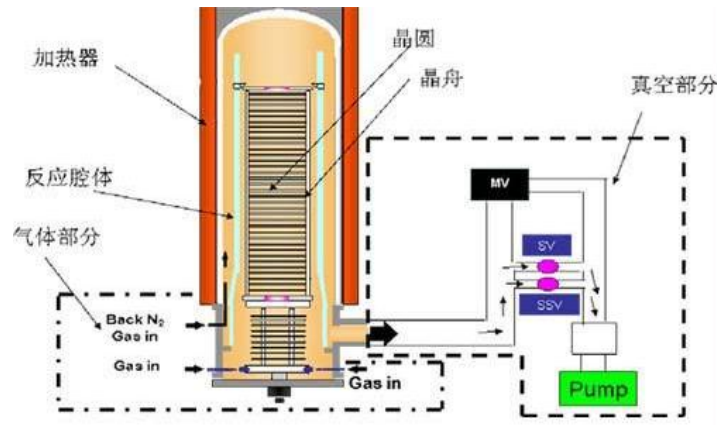


图 8-5 立式炉管示意图

LPCVD 设备可以用于淀积 Si_3N_4 、SIPOS、POLY-Si、PSG、UDO 等，通入的气体分别为：

铝下 Si_3N_4 : SiH_2Cl_2 、 NH_3

SIPOS: SiH_4 、 N_2O

POLY-Si: SiH_4

UDO: SiH_4 、 O_2

铝上、铝下 PSG+UDO:

PSG: SiH_4 、 PH_3 、 O_2

UDO: SiH_4 、 O_2

Si_3N_4 反应机理为： $3\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + 4\text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 6\text{HCl}\uparrow + 6\text{H}_2\uparrow$
(650~750°C)

LPCVD SIPOS 钝化常用于可控硅产品的铝下 CVD，具体工艺步骤为：

1) 硅表面氧化层去除：利用 NH_3F 腐蚀液(可加入适量的 5%HF 溶液)常温腐蚀(为了腐蚀充分，时间需要长点)后冲水，再在甩干机中甩干。

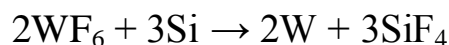
2) 前处理：利用清洗 SC-1+SC-2 溶液方式处理，然后甩干。

3) 酸处理：在酸液(HNO_3 : HF=99: 1)中浸泡，上下抖动，在纯水中冲洗后甩干。

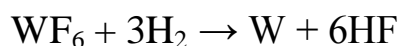
4) 进炉：在酸处理后需要立即进炉钝化，保持各个步骤衔接。

SIPOS 含氧量与湿法腐蚀速率有关，须通过测试湿法腐蚀速率对 SIPOS 含氧量进行监控。常见的薄膜淀积原理如下。

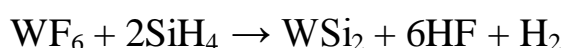
钨淀积：通常我们用 CVD 淀积难以控制的金属膜，其中主要是钨。钨可以用于各种元件构造，包括接触阻挡层，MOS 管的栅极互连和过孔填充。过孔填充是形成有效的多金属层系统的关键。绝缘层比较厚，而过孔相对瘦一些(高宽比大)。这两个因素有助于较难的连续的金属淀积过孔，而且不会降低金属密度。因此我们选择 CVD 淀积钨来填充整个过孔，而且为接续而来的导电金属层淀积提供了平整表面。钨作为阻挡层金属，它的淀积可以通过硅与六氟化钨(WF_6)气体反应进行。其反应式：



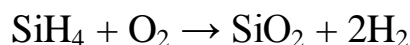
钨还可以通过 WF_6 的反应淀积在铝和其他材料上。这个工艺被称为衬底缩减。钨可以通过 WF_6 和 H_2 生成，其反应式：



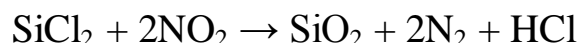
以上所有淀积都是在 LPCVD 系统中进行，温度大约为 300°C 。这可以与镀铝工艺相适应。硅化钨和硅化钛层的工艺反应式：



二氧化硅淀积：由于铝和硅的合金过程不允许在 450°C 以上进行，所以需要在低温下淀积 SiO_2 。早期使用的淀积工艺是采用水平热传递系统，通过硅和氧气的反应得到：



这种工艺形成的薄膜，由于是在 450°C 淀积，薄膜的质量较差，并不适用于高级的器件设计和较大的晶圆。LPCVD 系统的开发为获取高质量的薄膜提供了可能，特别对阶梯覆盖和低应力等因素。从质量和生产效率角度考虑，LPCVD 工艺是首选的淀积技术。二氧化硅是在高温(900°C)LPCVD 中采用氯化硅(SiCl_2)与二氧化氮(NO_2)反应形成的：



实验内容

1. 溅射镀膜 PVD 操作流程

- 1) 检查 PVD 设备状态;
- 2) PVD 设备参数设置;
- 3) 上料;
- 4) PVD 设备开始作业: 理片—预清洁—PVD—冷却;
- 5) 作业完成后下料。

2.CVD 操作流程

- 1) 检查 CVD 设备状态;
- 2) CVD 设备参数设置;
- 3) 上料;
- 4) CVD 设备开始作业;
- 5) 作业完成后下料。

实验仪器

1.磁控溅射沉积设备

磁控溅射沉积系统包括: 气路、真空系统、循环水冷却系统、控制系统, 磁控溅射沉积设备如图 8-6 所示。



图 8-6 磁控溅射沉积设备

1) 气路系统: 气路中一般为 Ar、N₂ 等气体。这些气体并不参与成膜, 而是通过发生辉光放电现象将靶材原子轰击下来, 使靶材原子获得能量沉积到衬底上成膜。

2) 真空系统: 沉积薄膜前需要将真空腔室抽至高真空。因此, 其真空系统也包括机械泵、分子泵这一高真空系统。

3) 循环水冷却系统: 工作过程中, 一些易发热部件(如分子泵)需要使用循环水带走热量进行冷却, 以防止部件损坏。

4) 控制系统: 综合控制系统各部分协调运转完成薄膜沉积, 一般集成与控制柜。

2.化学气相沉积设备(LPCVD)

大部分的 CVD 系统的基本部分是相同的, 如管式反应炉、气体箱、反应室、能源柜、晶圆托架(舟体)和装载、卸载机械装置。在某些情况下, CVD 系统则是一种专用的预氧化和扩散的管式反应炉。化学气源被存储在气体箱内。蒸气从压缩的气体瓶或液体发泡源中产生。气体流量是通过限压器、流量计和计时器共同控制, 化学气相沉积设备如图 8-7 所示。



图 8-7 化学气相沉积设备

设备整体结构可分为硅片盒装载系统(load port)、硅片盒存储系统(stocker)、设备主机箱、延伸控制柜、遥控电源柜等几大部分；用工业计算机对工艺时间、温度、气体流量、阀门动作、反应室压力实现自动控制。

实验指导

1.选择实验内容

鼠标点击相关实验内容，进入到该实验操作设备前，实验项目选择界面如图 8-8 所示。



图 8-8 选择实验界面

2.选择实验模式

选择学习模式操作者可以从左侧实验步骤中任意模块进行操作。选择考核模式操作者可以从实际工艺流程往下一步一步操作。在考核模式下记录学生考核的问题及操作步骤，实验模式选择界面如图 8-9 所示。

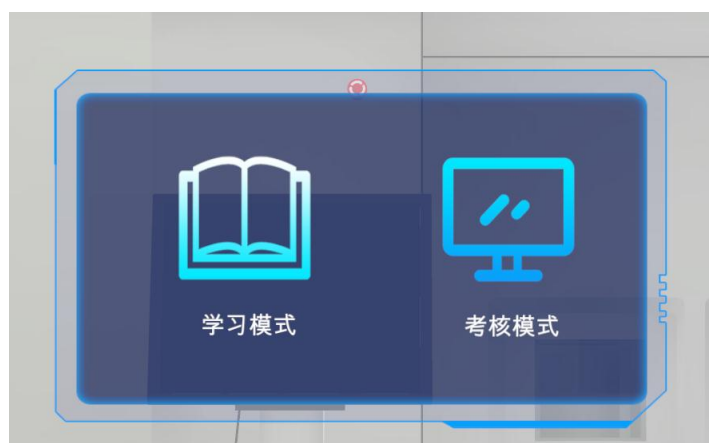


图 8-9 实验模式选择

3.实验操作指导界面

界面介绍本工艺知识点及操作者在实验过程中的操作指导，如图 8-10 所示。



图 8-10 实验操作指导

4.薄膜淀积 CVD 操作流程

1) 漫游走到仪器室，鼠标点击“气柜”，气柜如图 8-11 所示。



图 8-11 气柜

2) 返回到电脑屏幕前，在“Add New Lot Name”处输入作业名称，如图 8-12 所示。



图 8-12 Add New Lot Name

3) 鼠标点击“OK”按钮，如图 8-13 所示。



图 8-13 作业名称确认

4) 鼠标点击“Sequence Name”下的第一格，如图 8-14 所示。



图 8-14 Sequence Name

5) 鼠标点击“CVD SEQ”按钮，如图 8-15 所示。

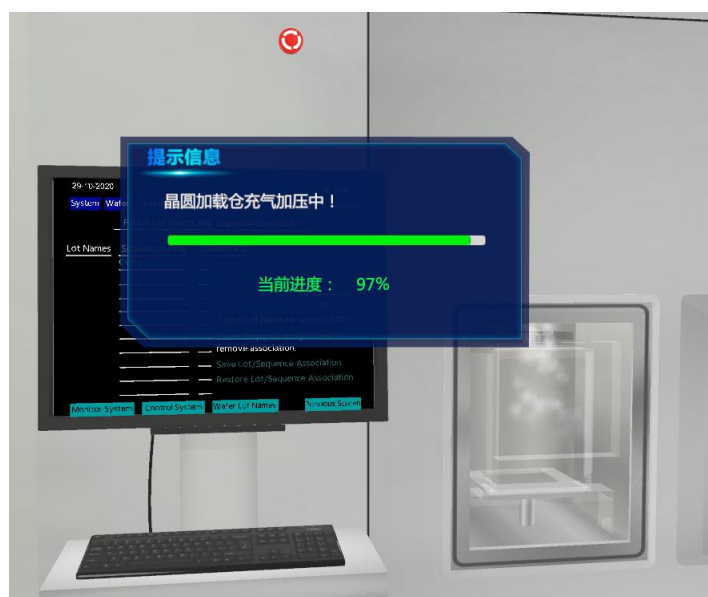


图 8-15 CVD SEQ

6) 鼠标点击“Load A”按钮，进行充气加压，如图 8-16 所示。



(a) Load A



(b) 晶圆充气加压

图 8-16 晶圆充气加压

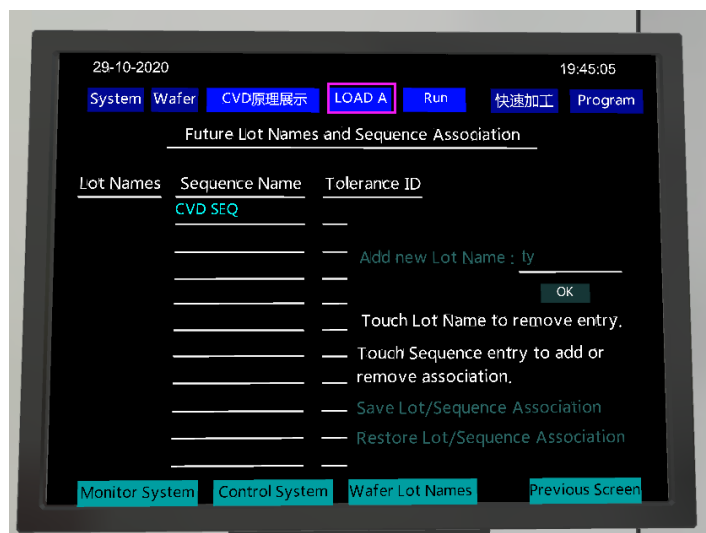
7) 鼠标点击“Run”按钮，如图 8-17 所示。



图 8-17 设置界面

8) 取出晶圆。

淀积结束后，鼠标点击“Load A”按钮，进行充气加压；加压后点击“晶圆”，晶圆放回原处，如图 8-18 所示。



(a) Load A



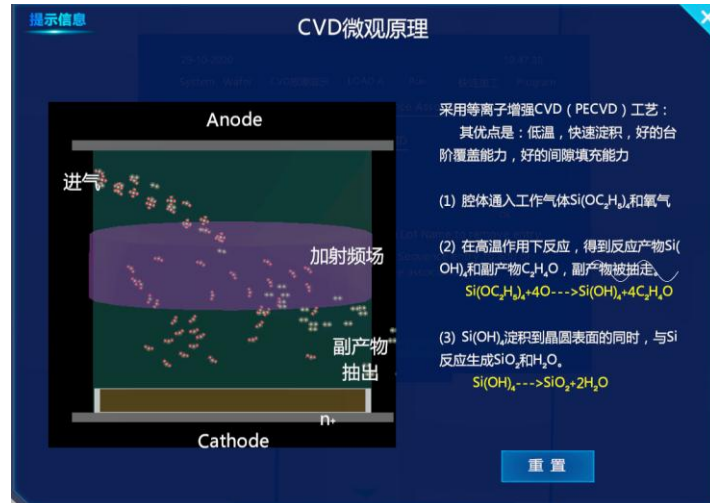
(b) 压后取出晶圆

图 8-18 取出晶圆

9) 鼠标点击设备控制界面上的“CVD 原理展示”按钮，弹出 CVD 原理展示界面，如图 8-19 所示。



(b) CVD 原理展示



(b) CVD 微观原理

图 8-19 CVD 原理展示

5.薄膜淀积 PVD 操作流程

1) 漫游走到仪器室，鼠标点击“气柜”，气柜如图 8-20 所示。



图 8-20 气柜

2) 返回到电脑屏幕前，在“Add New Lot Name”处输入作业名称，如图 8-21 所示。

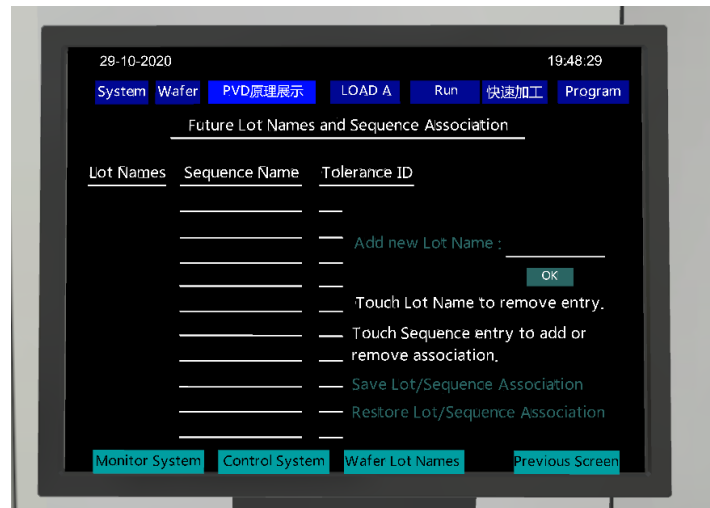


图 8-21 Add New Lot Name

3) 鼠标点击“OK”按钮，如图 8-22 所示。

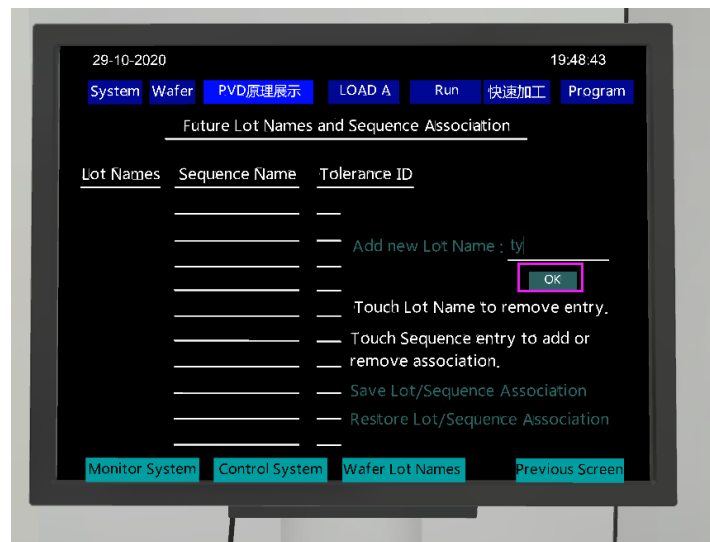


图 8-22 作业名称确认

4) 鼠标点击“Sequence Name”下的第一格，如图 8-23 所示。

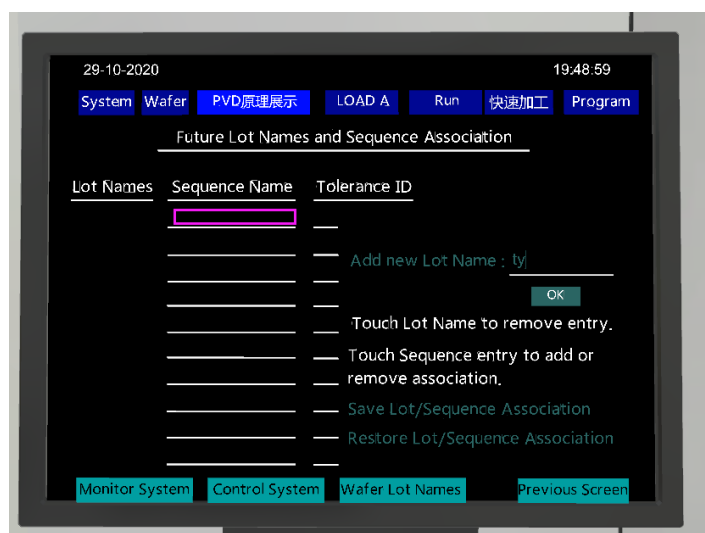


图 8-23 Sequence Name

5) 鼠标点击“PVD SEQ”按钮，如图 8-24 所示。



图 8-24 PVD SEQ

6) 鼠标点击“Load A”按钮，进行充气加压，如图 8-25 所示。

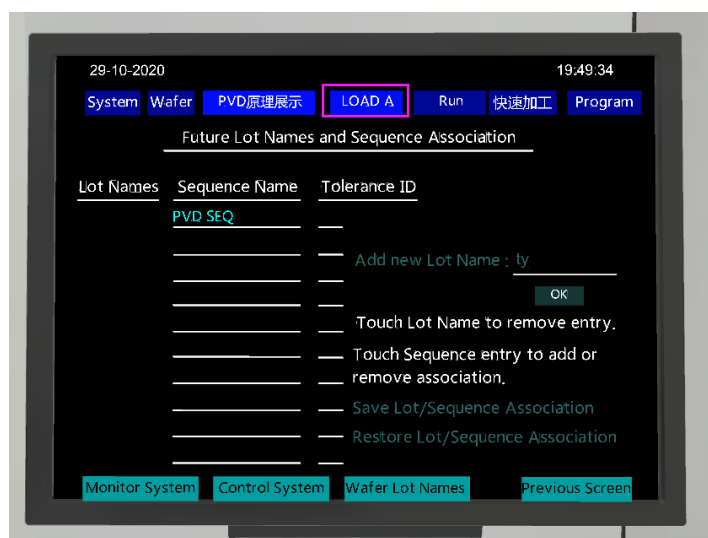


图 8-25 Load A

7) 鼠标点击“Run”按钮，如图 8-26 所示。

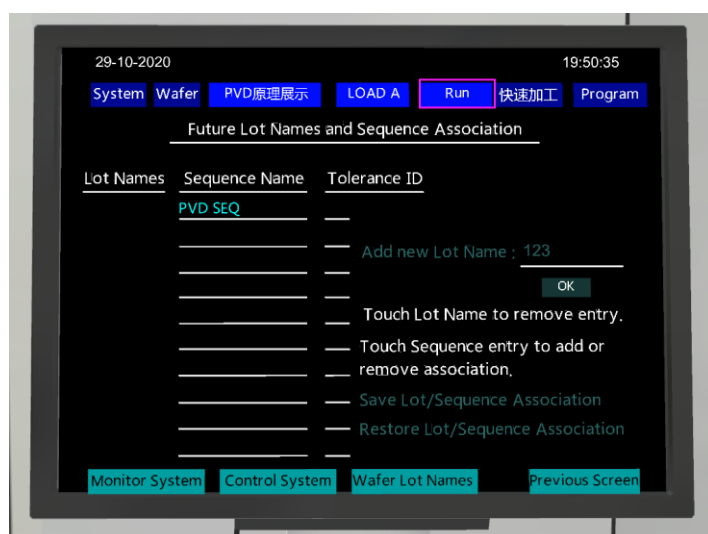


图 8-26 设置界面

8) 鼠标点击左侧 PVD 实验步骤中“PVD 作业—理片”按钮，如图 8-27 所示。

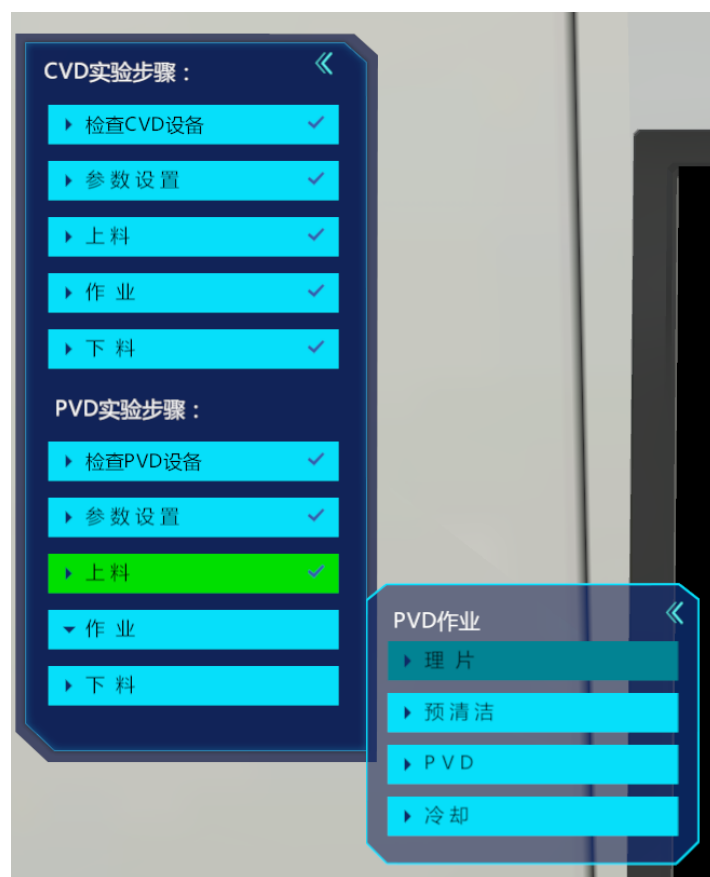


图 8-27 PVD 作业-理片

9)鼠标点击左侧 PVD 实验步骤中“PVD 作业—预清洁”按钮，
如图 8-28 所示。

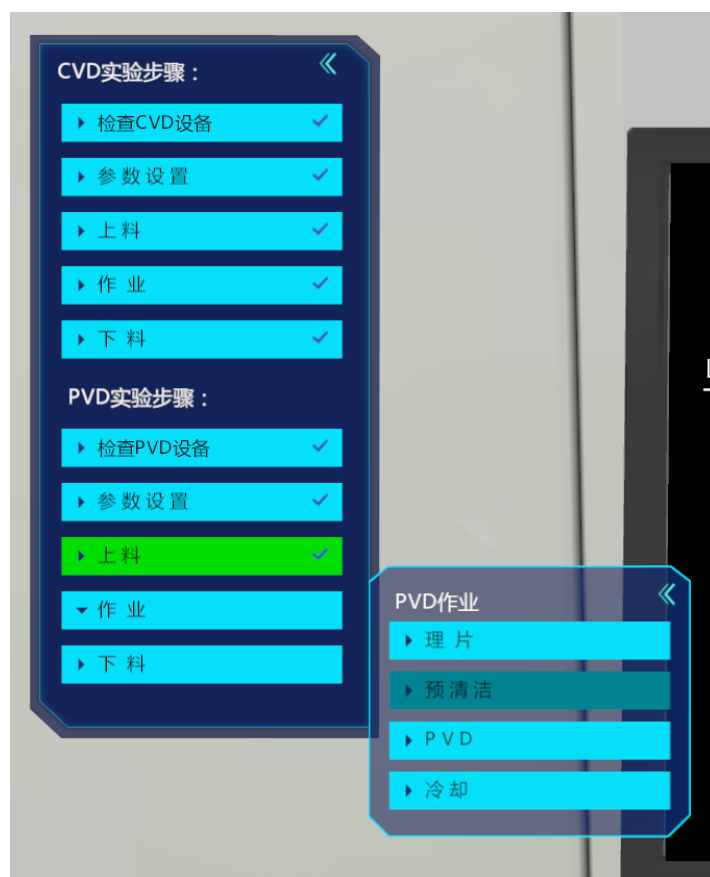


图 8-28 PVD 作业-预清洁

10) 鼠标点击左侧 PVD 实验步骤中“PVD 作业—PVD”按钮，
如图 8-29 所示。

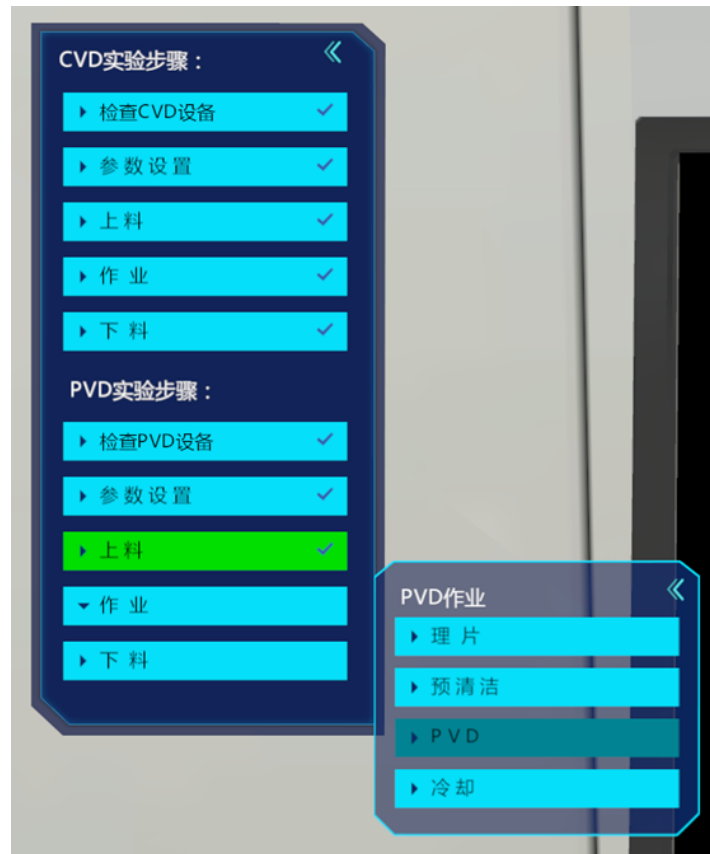


图 8-29 PVD 作业-PVD

11)鼠标点击左侧PVD实验步骤中“PVD作业—冷却”按钮，
如图 8-30 所示。

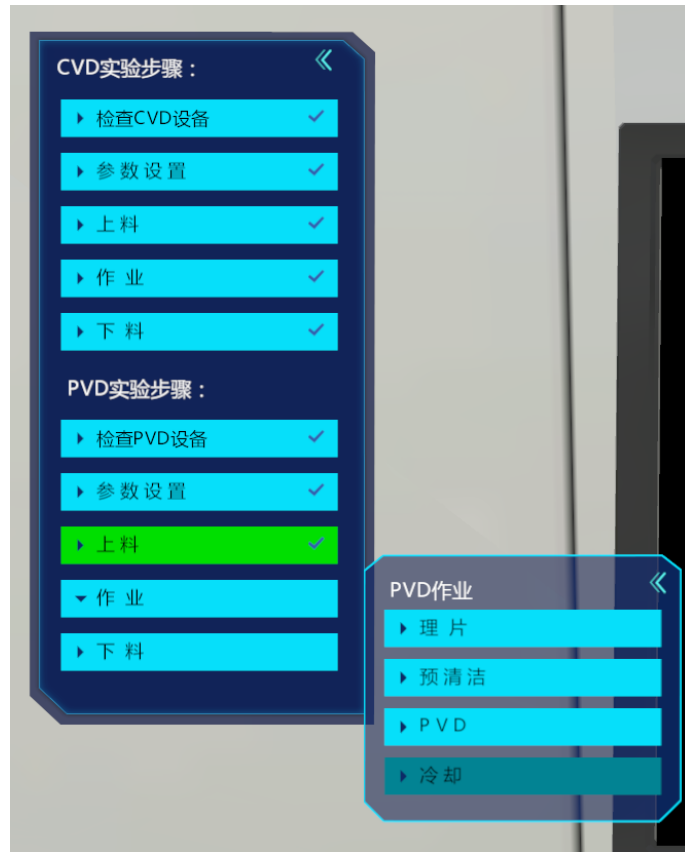
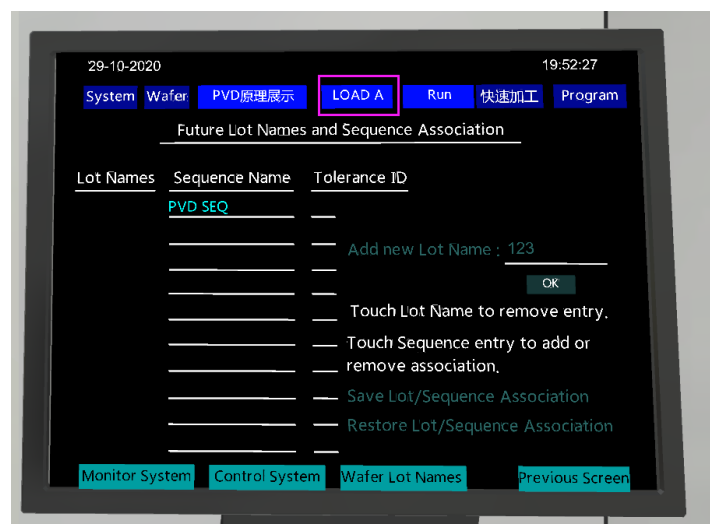


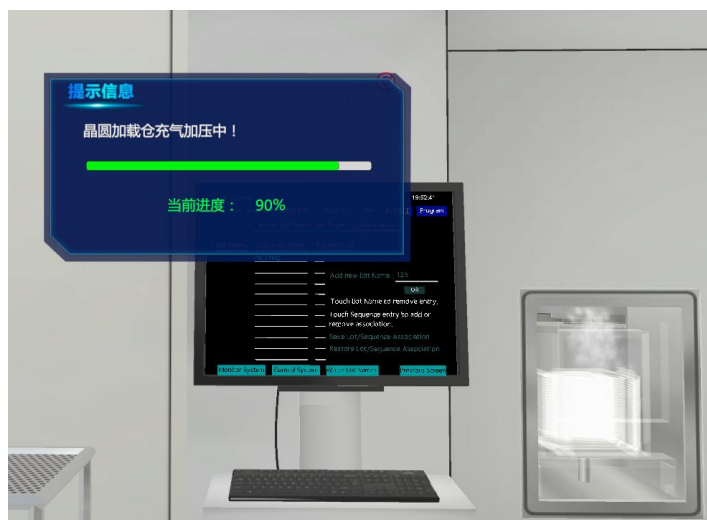
图 8-30 PVD 作业-冷却

12) 取出晶圆。

淀积结束后，鼠标点击左侧 PVD 实验步骤中“下料”按钮，然后在设备控制界面上鼠标点击“Load A”按钮，进行充气加压；加压后点击“晶圆”，晶圆放回原处，如图 8-31 所示。



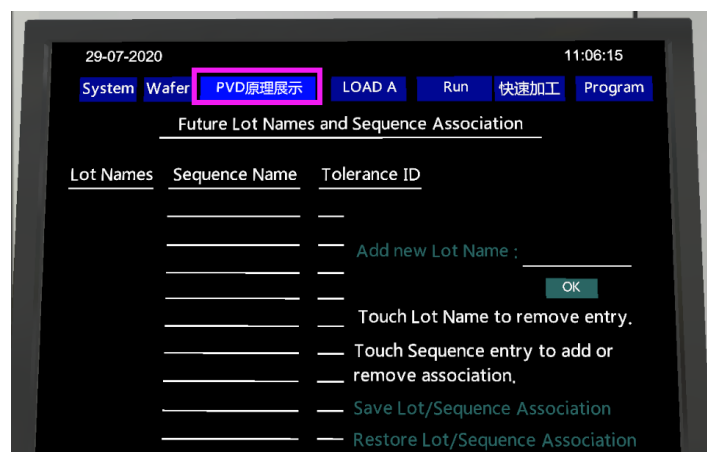
(a) Load A



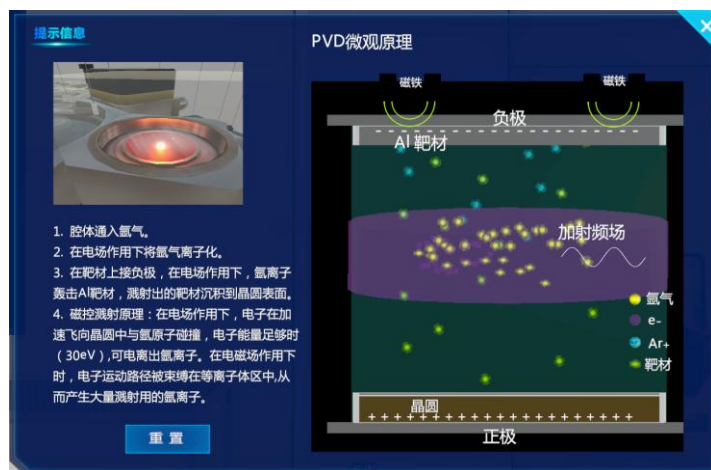
(b) 加压后取出晶圆

图 8-31 取出晶圆

13) 鼠标点击设备控制界面上的“PVD 原理展示”按钮，弹出 PVD 原理展示界面，如图 8-32 所示。



(a) PVD 原理展示



(b) PVD 微观原理

图 8-32 PVD 原理展示

14)实验操作结束。请继续进行其他实验项目。退出实验时，保存该实验数据记录，如图 8-33 所示。

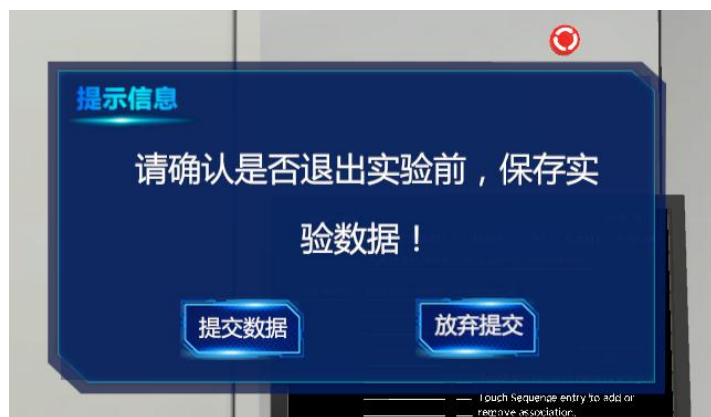


图 8-33 实验操作结束

思考题

- 1.描述化学气相淀积的原理。
- 2.列出由 CVD 技术淀积的导体、半导体和绝缘材料。
- 3.解释外延层和多晶硅层之间的区别。
- 4.为什么氧化硅钝化？

5. 写出从四氯化硅生成硅的反应式。
6. 相对于真空蒸发工艺，溅射工艺有什么优点。
7. 晶圆表面的什么条件对多晶硅层淀积是必要的？
8. 用什么对淀积的氧化硅进行掺杂？

参考资料

1. 《微电子制造科学原理与工程技术》，第二版，Stephen A.Campbell 著；
2. 《芯片制造》，第六版，Peter Van Zant 著；
3. 《硅集成电路芯片工厂设计规范》，GB50809-2012；
4. 《半导体制造技术》，Michael Quirk, Julian Serda 著；
5. 《半导体器件基础》，Robert F.Pierret 著；