

扩散实验

实验简介

掺杂的作用是制作 N 型或 P 型半导体区域，以构成各种器件结构。掺杂工艺的基本思想就是通过某种技术措施，将一定浓度的三价元素(如硼、镓)或五价元素(如磷、砷等)掺入半导体衬底，从而使原材料的部分原子被杂质原子代替。掺杂工艺方法分为：热扩散法和离子注入法。

热扩散是最早使用也是最简单的掺杂工艺，它利用原子在高温下的扩散运动，使杂质原子从浓度很高的杂质源向硅中扩散并形成一定的分布。热扩散通常分两个步骤进行：预淀积(预扩散)和主扩散(也称推进)。预淀积是在高温下利用诸如硼、磷等杂质源对硅片上的掺杂窗口进行扩散，在窗口处形成一层较薄但具有较高浓度的杂质层。主扩散是将预淀积所形成的表面杂质层作为杂质源，在高温下将这层杂质向硅体内扩散的过程。通常推进的时间较长。

实验原理

半导体材料可掺杂 N 型或 P 型导电杂质来调变阻值，却不影响其机械物理性质的特点，是进一步创造出 P-N 接合面、二极管、晶体管，以至于大千婆娑之集成电路(IC)世界之基础。而扩散是达成导电杂质搀染的初期重要制程。扩散的发生需要两个必要的条件。第一，一种材料的浓度必须高于另外一种。第二，系

统内部必须有足够的能量使高浓度的材料进入或通过另一种材料。扩

散的原理被用来将 N-型或 P-型杂质引进到半导体表层深部。

扩散工艺的目的有三个：①在晶圆表面产生具体掺杂原子的数量(浓度)；②在晶圆表面下的特定位置处形成 N-P(或 P-N)结；③在晶圆表面层形成特定的掺杂原子(浓度)分布。

杂质扩散即属于质量传输的一种，需要在 850℃ 以上的高温环境下，效应才够明显。

在扩散炉管里，晶圆在高温条件下暴露于一定浓度的 N-型杂质中。N-型杂质透过氧化层上的空洞扩散到晶圆内部。

对晶圆不同深度处发生的变化的检查，显示了掺杂在晶圆内部引起的变化。扩散炉管中的条件设置使得扩散到晶圆内部的 N-型杂质原子数量高于第一层中 P-型原子的数量。在此演示中，N-型原子比 P-型原子多，从而使其成为 N-型导电层。扩散过程随着 N-型原子从第一层向第二层的扩散，最后会扩散到晶圆深部。

热扩散通常分两个步骤进行：预淀积(预扩散)和主扩散(也称推进)。预淀积是在高温下利用诸如硼、磷等杂质源对硅片上的掺杂窗口进行扩散，在窗口处形成一层较薄但具有较高浓度的杂质层。主扩散是将预淀积所形成的表面杂质层作为杂质源，在高温下将这层杂质向硅体内扩散的过程，通常推进的时间较长。

扩散源：一定浓度的三价元素(如硼、镓)或五价元素(如磷、

砷等), 利用原子在高温下的扩散运动, 使杂质原子从浓度很高的杂质源向硅中扩散并形成一定的分布。

1) CSD 涂源扩散(硼源)。

CSD 涂源扩散的步骤为: CSD 涂源→CSD 预淀积→后处理→基区氧化→基区再扩散(或者后两步同时进行即基区氧化再扩散)。

(1) 硼源 CSD 涂覆: 利用涂源机在硅片表面进行硼源涂覆, 硼源选用硼源 B_3O , 主要成份是 B_2O_3 , 液态。涂源步骤如下。①清洗: 硅片在 2 号清洗液中清洗, 如果硅片较脏, 还需要在煮沸的 SH 清洗液中浸泡清洗; ②涂覆: 硅片旋转速度约为 2500 转/min, 涂覆后硅片传送到加热板, 温度为 $(80 \pm 1)^\circ\text{C}$, 加热时间为 20s; ③测试: 硼源涂覆的厚度为 $0.5\mu\text{m}$, 利用假片测试涂覆的厚度和均匀性, 用紫外分光光度计分别测试硅片的上、下、左、右、中五点; ④检验: 涂覆的硼源表面要求无发花、无缺损、无颗粒等; ⑤返工: 如果硅片表面发花, 则用纯水冲洗干净后再涂布。

2) CSD 硼源预淀积。

在扩散炉中预淀积, 预淀积后需要测试硅片 ρ_s 。方法是将陪片表面的二氧化硅腐蚀掉, 然后利用四探针测试仪测试表面的电阻率。不同产品预淀积的时间、温度都有所不同。

如果硅片由于卡位在扩散炉炉口停留过久造成硼源氧化, 则需要返工。首先用 SH-3 清洗液将硅片清洗干净, 然后用 HF 溶液去除表面 SiO_2 , 甩干后再重新涂布硼源。

3) 后处理。

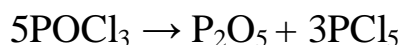
用 5% 的 HF 溶液浸泡 10 到 20 分钟。

4) 再扩散。

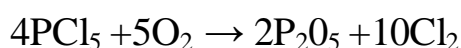
硅片手动进出炉，再扩散后的硅片需要测试电阻率 ρ_s 和结深 j_x 。

5) POCl_3 扩散。

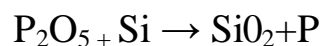
POCl_3 扩散的作用有：磷掺杂、 N^+ 淀积和磷吸杂。 N^+ 淀积和磷吸杂只需要经过 POCl_3 预淀积步骤， N^+ 淀积的后处理采用 5% HF 溶液进行泡酸处理，而磷吸杂后处理采用 P 液处理 30s。三氯氧磷预淀积是半导体制造过程中常用的掺杂工艺，其工艺原理主要是通高纯氮气携带 POCl_3 进入炉管， POCl_3 在高温下分解：



同时,通一定量的氧气，与分解产物 PCl_5 起反应，改善硅片的表面质量，防止侵蚀：



P_2O_5 与硅片表面接触并与硅原子发生还原反应，生成 P 原子和 SiO_2 , P 原子在高温下扩散进入硅片内部：



在淀积后到降温过程中有一定的再扩推结作用。

POCl_3 扩散的步骤为： POCl_3 预淀积→后处理→氧化→再扩散(或者后两步同时进行即氧化再扩散)。各个分步骤为：

(1) POCl_3 预淀积：步骤同扩散的 POCl_3 预淀积，但是不同

产品预淀积的时间、温度都有所不同。预淀积在扩散炉中进行，预淀积后需要测试硅片 ρ_s 。

(2) 后处理：磷吸杂后处理(常常用于外延片小功率产品)利用 P 液(纯水 HF: HNO_3 =300: 15: 10)将硅片磷吸杂后形成大的 PSG 泡酸去除，一般为 30s，如果没有去除干净则加时，P 液的温度和 PSG 腐蚀速率有很大关系；

磷吸杂原理：磷硅玻璃是由 P_2O_5 和 SiO_2 的混合物共同组成，结构中存在氧空位，它是负电中心，所以能对以 Na^+ 为代表的可动电荷起到固定提取和阻挡的作用，并且 Na^+ 绝大部分分布在 PSG 中，浓度比 SiO_2 中高三倍。

磷掺杂后处理：利用 5% 的 HF 溶液浸泡 20min 去除表面的氧化层。

(3) 氧化：步骤扩散的 POCl_3 氧化，在扩散炉中氧化，但是不同产品采用的氧化方式、氧化的时间、温度都有所不同。

(4) 再扩散：将硅片装入石英舟中，将扩散炉炉管预热到 800°C 之后，将载有硅片的石英舟按照一定速度慢慢推进炉管后，炉管以一定速率加热升温至工艺温度，经过若干小时(视情况而定)扩散后，炉管内以一定速率慢慢降温，将石英舟慢慢拉出。

实验内容

1.扩散设备介绍

2.检查机台状态

3.放置晶圆片

将硅片放入石英管中，依次进行开炉、上料、闭炉操作。

4.设置扩散参数

在操作面板中点击“设置参数”按钮，显示参数。

5.观察扩散原理

观察扩散动画效果。

6.扩散

扩散后，炉管内慢慢降温，待晶圆冷却至室温后。

7.打开舱门

关闭加热，关闭气体，扩散炉舱门打开。

8.取出晶圆片

实验仪器

1.扩散炉

设备结构分为四大部分：控制部分、推舟净化部分、炉体部分、气柜部分。

扩散炉采用微机控制，智能程度高，可扩展。通过触摸屏可以完成所有的日常操作。温度控制使用先进的双 PID 级联控温技术，直接控制炉内的温度，使得反应温度控制更准确稳定，从而使工艺更加稳定，省去频繁校正平坦区温度的工作。

2.推舟净化部分

推舟部分保证碳化硅浆及其上的石英舟平稳地进出，有完备的安全保护措施，除限位开关外，还有极限保护开关，即使两者

都失效，急停按钮也能立即停止推舟，防止损坏部件和硅片。净化部分提供水平层流洁净风，形成一个局部高洁净区，防止进出舟时空气污染炉管，同时也有给硅片降温的功能。

3.炉体部分

炉体配置有水冷散热器及排热风扇，废气室设有抽风口，与外接负压抽风管道连接后，可将工艺过程残余的废气带走。

4.气柜部分

气柜设置有排气口，用以排除可能泄漏的有害气体；对应于气路，各层分别装有相应的电磁阀、气动阀、过滤器、单向阀、质量流量控制器(MFC)，以及源瓶恒温槽等，用以对进气压力进行控制及调节。

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，实验选择界面如图 6-1 所示。



图 6-1 实验选择界面

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分数，实验模式选择如图 6-2 所示。



图 6-2 实验模式选择

3.实验操作指导

界面介绍本工艺知识点及操作者在实验过程中操作指导，实验操作指导界面如图 6-3 所示。



图 6-3 实验操作指导界面

4.扩散炉设备实验操作步骤

1) 介绍设备结构。

鼠标左键点击“设备”，弹出设备介绍信息，点击“下一步”继续介绍设备相关结构，设备结构介绍如图 6-4 所示。

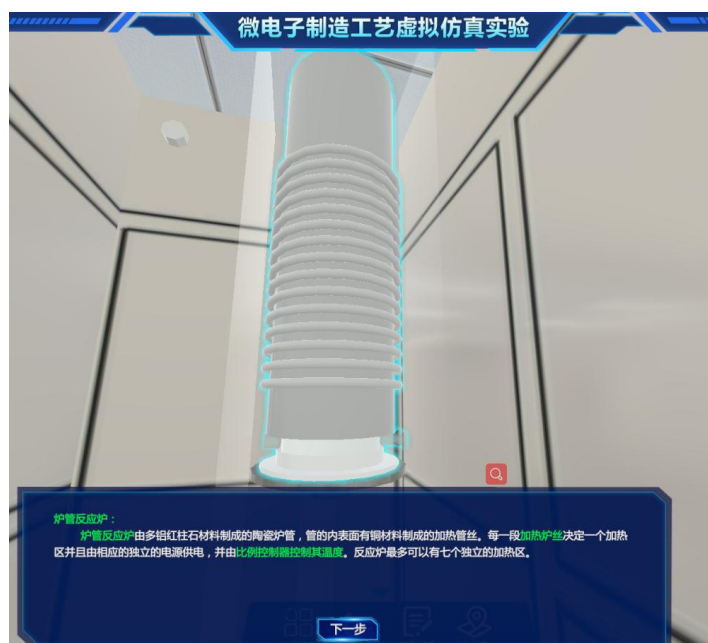


图 6-4 设备结构介绍

2) 检查机台状态。

漫游走到“扩散炉”操作台，鼠标点击“控制面板”，弹出控制面板窗口，检查机台状态。

3) 将晶圆放置到扩散炉进料处内。

鼠标点击“扩散炉”操作台旁边小车上的“晶圆匣”，晶圆匣自动放置到待处理窗口中。

4) 点击设备控制面板上的“参数设置”按钮。

5) 点击“Edit”按钮，弹出扩散曲线，Edit 界面如图 6-5 所示。

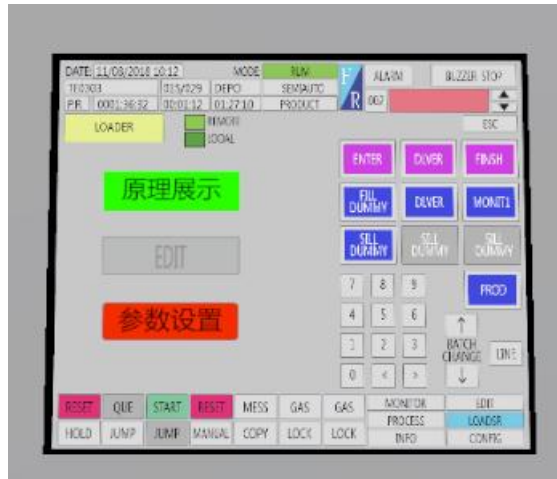


图 6-5 Edit 界面

6) 选择扩散时间与杂质浓度，计算扩散结深，扩散预淀积过程如图 6-6 所示。

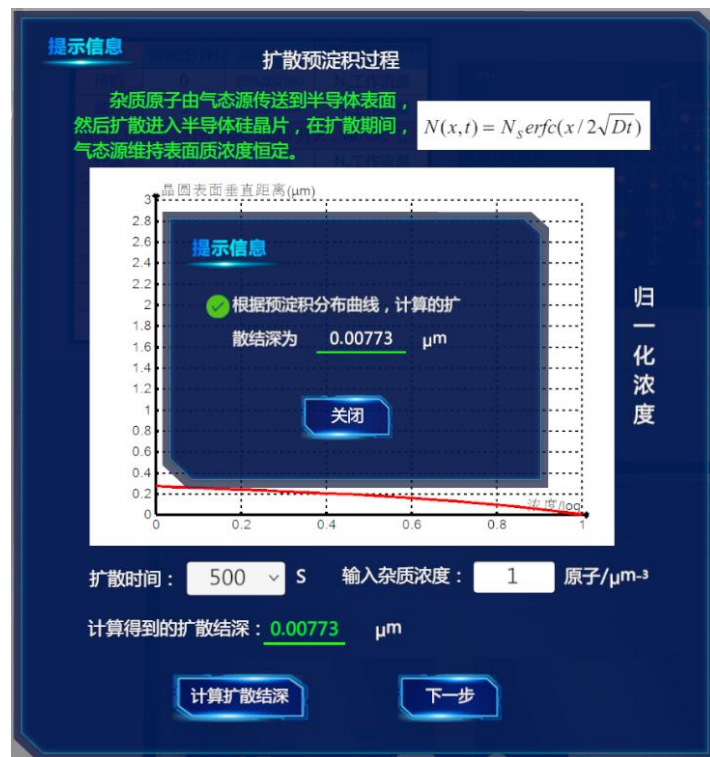


图 6-6 扩散预淀积过程

7) 点击“下一步”，弹出定量扩散曲线，选择扩散时间、杂质浓度，计算扩散结深，点击“扩散”，扩散主扩散过程如图 6-7 所示。

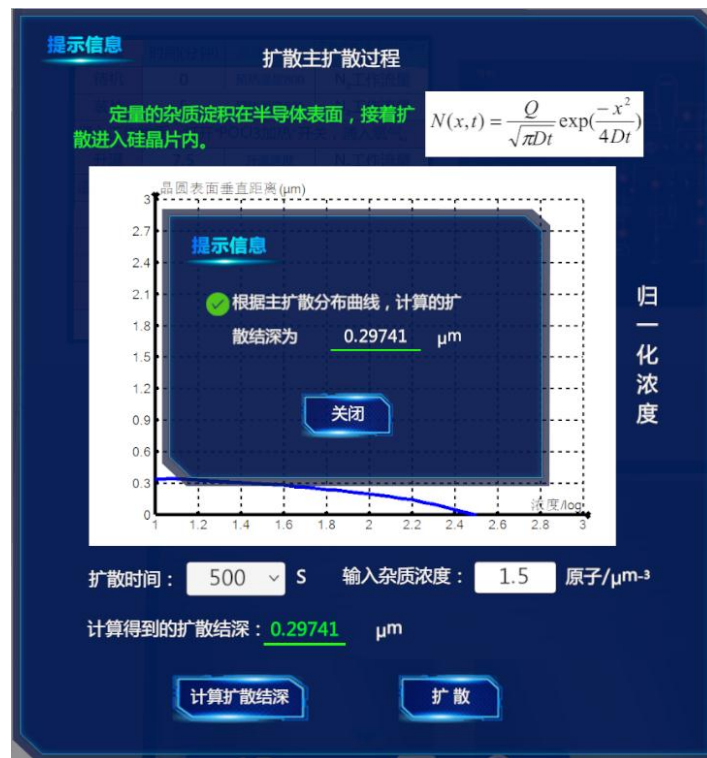


图 6-7 扩散主扩散过程

- 8) 上料完成后, 关闭炉舱门。
- 9) 关闭舱门后进行加热, POCl_3 加热, 通入气体。
- 10) 进行扩散, 观察扩散动画效果。

鼠标点击设备控制面板上的“原理展示”按钮, 弹出原理展示动画界面如图 6-8 所示。

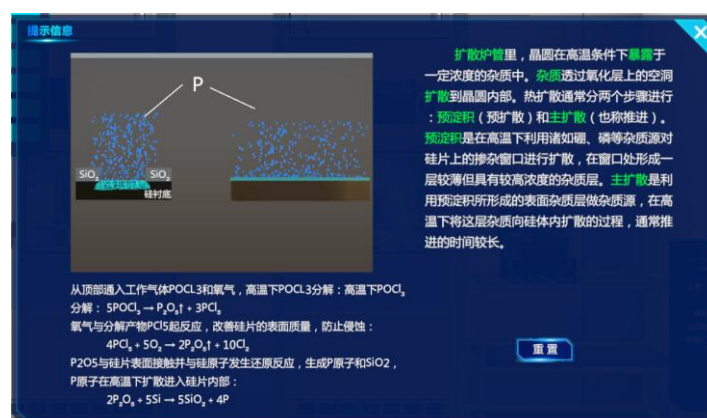


图 6-8 扩散原理动画展示

- 11) 扩散后, 炉管内缓慢降温, 待晶圆冷却至室温后, 打开

扩散炉舱门，取出晶圆片。

12) 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，实验结束退出实验界面如图 6-9 所示。



图 6-9 实验结束退出实验

思考题

1. 举出扩散工艺中所使用的三种源物质。
2. 扩散与离子注入形成的杂质浓度分布剖面有何不同？
3. 未扩散上及扩散不充分的可能原因有哪些？

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；