

离子注入实验

实验简介

在扩散制程的中，采用离子注入法可以得到图案更精细、浓度更低的杂质掺入。离子注入法是将 III 族或 IV 族之杂质，以离子的形式，经加速后冲击进入晶圆表面，经过一段距离后，大部分停止至离晶圆表面 0.1 微米左右的深度(视加速能量而定)，故浓度最高处不是在表面。不过因为深度很浅，一般还是简单认定大部分离子是掺杂在表面上，然后进一步利用驱入(drive-in)来调整浓度分布，并对离子撞击过的区域，进行结构修补。基本上，其为低温制程，故可直接用光阻来定义植入的区域。一般浅结高浓度器件适合扩散工艺，而浅结低浓度器件用离子注入工艺。离子注入能保证结深的一致性、重复性，从而确保器件参数的一致性，尤其是 HFE，离子注入的杂质浓度分布一般呈现为高斯分布。

在离子注入前一般干氧氧化形成一层大约 1000Å 的氧化层，氧化层的作用是：①减少离子注入时对硅片的损伤，起屏蔽作用；②离子注入后杂质在硅中的分布为高斯分布，即注入至表面一段距离后(大约 1000Å)留在硅片中，为了使得硅片表面的杂质浓度最高，在离子注入前淀积一层氧化层，就可以使得浓度最高处在硅的表面。

实验原理

离子注入法的特点是可以精密地控制扩散法难以得到的低浓度杂质分布。离子注入克服了扩散的限制同时提供了额外的优势。离子注入过程中没有侧向扩散，工艺在接近室温下进行，杂质原子被置于晶圆表面的下面，同时使得宽范围浓度的掺杂成为可能。有了离子注入，可以对晶圆内掺杂的位置和数量进行更好的控制。光阻和金属层与通常的二氧化硅层一样可以用作掺杂的掩膜。基于这些优点，先进电路的主要掺杂步骤都由离子注入完成。

掺杂原子被离子注入机进行离化、分离、加速(获取动能)，被注入的离子是掺杂物原子离化产生的。离化过程发生在通有源蒸汽的离化反应腔中进行。该反应腔体保持约 10^{-3} 托的低压。反应腔体内部灯丝被加热到其表面可以发射电子的温度。带负电的电子被反应腔中的正电极所吸引。电子从灯丝运动到正电极的过程中与杂质源分子碰撞，产生大量该分子所含元素形成的正离子。离子束流扫过晶圆，杂质原子对晶圆进行物理轰击，进入表面并在表面以下停下。

在离子注入中，比较重要的控制参数有：原子量、注入能量、注入剂量、束流大小、注入时间、扫描次数等。它们之间的关系为 $I=Q/t$ ，注入剂量= Q/q ，从而可以计算出注入时间，但是这只是估算，可能在实际情况下，由于设备的不稳定性，当中有偏差。原子量控制的是注入杂质种类，注入能量控制注入的深度，即结深，注入剂量控制掺杂浓度。

注入能量和剂量根据产品的需要来确定，能量越高，注入的越深，一般硼注入的能量在 50keV 左右，磷注入的能量一般在 60—100keV，剂量一般在 10^4 、 10^5cm^{-3} 数量级。离子注入系统中必须保持高真空状态，至少在 10^{-6}torr 以下，以免残余气体与离子束反应，形成能量不正确的离子，造成玷污。

为了减小沟道效应，常常把硅片倾斜一个角度，如 100 晶向的硅片常用角度是偏离垂直方向 7° ，氧化层也可以减小沟道效应。

大束流离子注入一般用于深结的注入，硼注入采用 BF_3 ，磷注入采用红磷，红磷是固态源，注入时需要加热(300~350℃，坩埚不同，温度也不同)使其升华成气体。氩气作用是清洁离子源弧室以及作为固体源的携带源，它不作为离子注入源。

一般硼注入的束流不超过 2.2mA，磷注入的束流不超过 3.6mA。灯丝的电流大约为 200A，此时的弧流为 3~20A。通常采用机械扫描的方法进行注入，即载有硅片的转盘旋转并上下移动，而离子源固定，从而使得离子注入到硅片中。

中束流离子注入一般用于浅结的注入，硼注入采用 BF_3 ，磷注入采用 PH_3 。采用电扫描的方法进行注入，即离子源上下移动，而硅片固定，从而使得离子注入到硅片中，且它是一片一片进行注入，注入机会自动从片盒中拾取硅片。

注入损伤及退火：经过离子注入后的硅片表面会产生注入损伤，需要进行退火加以消除。高能粒子注入硅体内时与硅原子核发生碰撞，并把能量传输给硅原子，当硅原子能量足够大时可使

硅原子位移，当移位原子的能量较大时，还可使其它硅原子发生位移，从而形成一个碰撞与位移的连级，在硅中形成无数空位和间隙原子。这些缺陷的存在使半导体中载流子的迁移率减小，少子寿命缩短，从而影响器件性能。退火是在氮气的保护下使硅片在一定温度下保持一定时间，促使微观缺陷区下面未受损伤的硅单晶外延生长，从而使微观损伤区的晶体复原。退火还可以使那些注入硅中的杂质离子进入替代硅原子的位置，成为电活性杂质离子，从而起到受主或施主的作用。

通常，离子注入的深度较浅且浓度较大，必须使它们重新分布。同时由于高能粒子的撞击，导致硅结构的晶格发生损伤。为恢复晶格损伤，在离子注入后要进行退火处理。在退火的同时，掺入的杂质同时向半导体体内进行再分布。

退火可以单独进行退火工艺，还可以和注入后的扩散工艺同时进行，一般选择后者，以节省工艺步骤和时间。

离子注入最重要的质量控制是离子注入的均匀性，通常需要利用假片测试。测试条件为：利用 N 型假片进行硼注入，注入能量为 50keV，注入剂量为 $3 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$ ，注入后在 1050℃ 下快速退火 10s，然后利用 RS55 四探针测试仪测试硅片表面的电阻率，它们的偏差不能超过规定值。

有时离子注入需要分两步，第一次低浓度的离子注入后得到结深，第二次离子注入浓度高，是为了将浓度增加。

实验内容

1.上料

鼠标点击离子注入机操作台旁边小车上“晶圆匣”。

2.设置参数

鼠标点击离子注入机操作台界面 Supervisor 选项下的“Recipe Editor”，进入 recipe 详细设置界面并填写对应参数 (Implant Start Pressure、Implant Stop Pressure、Implant Time、Rotary Speed)。

3.参数确定

鼠标点击离子注入机操作台界面左下角“Add Cassete”按钮，进入 Add Cassete 界面并设置对应参数(Material ID、Recipe)，最后鼠标点击“Accept”按钮，则开始加载晶圆。

4.卸载晶圆

当弹出“25 片晶圆离子注入完毕”的提示信息时，鼠标点击离子注入机操作台界面左下角“Remove Cassette”按钮，则开始卸载晶圆。

实验仪器

1.离子源

离化过程发生在通有源蒸汽的离化反应腔中进行。该反应腔保持约 10^{-3} 托的低压。反应腔内部灯丝被加热到其表面可以发射电子的温度。带负电的电子被反应腔中的正电极所吸引。电子从

灯丝运动到正电极的过程中与杂质源分子碰撞，产生大量该分子所含元素形成的正离子。

2.引出电极(吸极)和离子分析器

引出电极：利用正负电荷互相吸引的特性，使离子以一定的初速度从离子源中引出。

分析仪产生磁场，不同种类的离子以 15 到 40keV 的能量离开离化系统。在磁场中，每一种带正电的离子的方向都会被以特定的半径沿弧形扭转。偏转弧形的半径由该种类离子的质量、速度和磁场强度决定。分析仪的末端是一个只能让一种离子通过的狭缝。磁场强度被调整为与硼离子能通过狭缝的要求所匹配的值。这样，只有硼离子通过分析系统。

3.加速管

加速管将离子加速到足够高速度，获取足够高的动量以穿透晶圆表面。

4.扫描系统

束流扫描的系统使束流通过多个静电场电极板。电极板的正负电性可受控改变，以吸引或排斥粒子束流。通过两个方向上的电性控制，束流会以光栅方式扫过整片晶圆。

5.工艺室

实际的离子注入发生在靶室内，靶室有时也被称为终端舱室。它包括扫描系统与进出机械装置。对靶室有几条很严格的要求：晶圆必须装载到靶室内，抽真空，晶圆必须逐一放到固定器上，

注入结束后晶圆被取下装入料盒，从靶室取出。机械运动可能比离子注入本身的时间更长。改进包括上下料舱，使得装载晶圆时不需要破坏靶室的真空。

晶片破碎时的碎片和粉尘会造成污染，需要耗费大量的时间进行清洁。晶圆表面的污染造成阴影效应，阻碍粒子束流入射。系统必须保持生产速度，必须快速实现真空以开始注入，同时快速恢复到常压以卸料。靶室可能装有探测器(法拉第杯)，以计数影响到晶圆表面的离子数目。这套监测系统使工艺自动化，允许离子束接触晶圆，直到达到正确的剂量。

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 7-1 所示。



图 7-1 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，选择实验模式如图 7-2 所示。



图 7-2 选择实验模式

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操作指导，实验工艺操作界面如图 7-3 所示。



图 7-3 实验工艺操作界面

4.离子注入工艺

1) 漫游走到“离子注入机”操作台，鼠标点击推车上的“晶圆

盒”，晶圆进行上料。

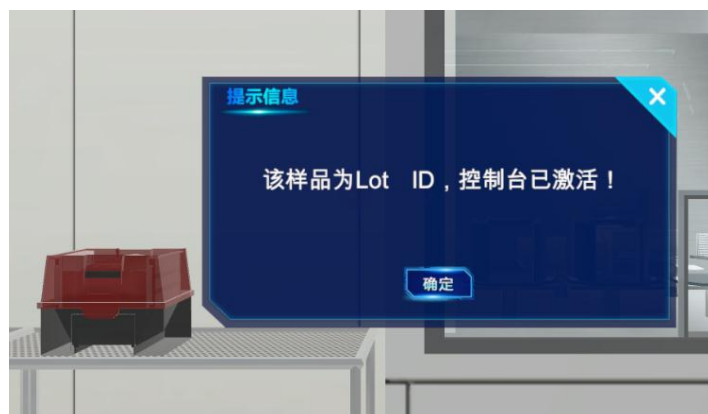


图 7-4 晶圆上料

2) 鼠标点击“离子注入机”操作台界面，打开 Recipe Editor 界面，并设置对应参数，参数设置界面如图 7-5 所示。



图 7-5 参数设置界面

3) 鼠标再次点击操作台界面左下角“Add Cassete”按钮，进入 Add Cassete 界面并设置对应参数，点击“Accept”按钮，Add Cassete 界面如图 7-6 所示。



图 7-6 Add Cassete 界面

4) 通过鼠标点击左侧作业下的各种步骤，展示相应的实验步骤操作如图 7-7 所示。

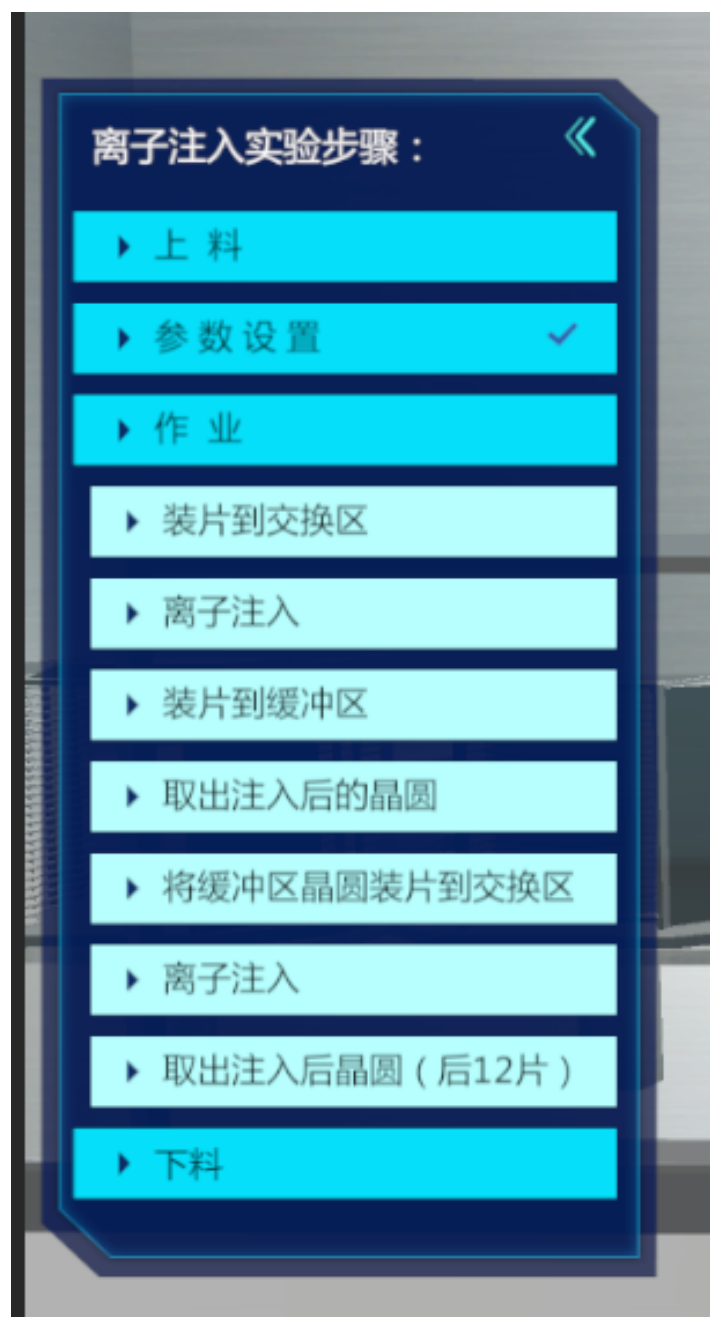


图 7-7 实验步骤操作

5) 播放完整动画，当弹出“25 片晶圆离子注入完毕”的提示信息时，鼠标点击左侧菜单“下料”按钮，开始卸载晶圆，晶圆离子注入结束界面如图 7-8 所示。

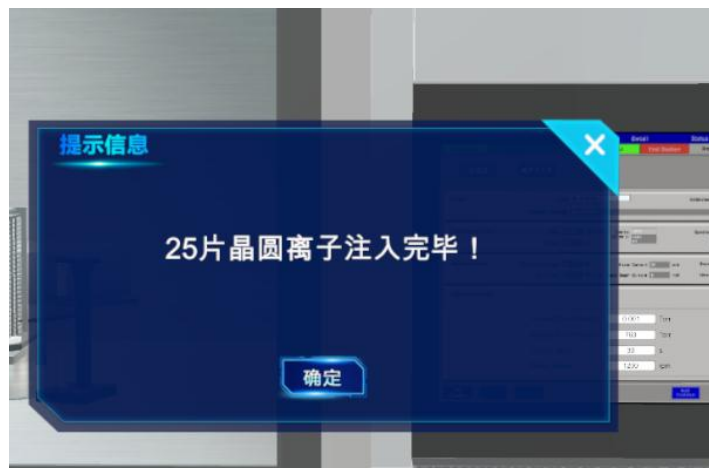


图 7-8 晶圆离子注入结束

6) 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 7-9 所示。



图 7-9 实验结束退出实验

思考题

1. 离子注入设备的主要部件包括哪些？
2. 给出两种离子注入掺杂用到的掩膜？
3. 离子注入后为何需要退火处理？
4. 比较扩散与离子注入工艺的优势劣势。
5. 离子注入深度受哪些因素影响？

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；