

刻蚀实验

实验简介

刻蚀的目的是把经曝光、显影后光刻胶微图形中下层材料的裸露部分去掉，即在下层材料上重现与光刻胶相同的图形。刻蚀方法分为干法刻蚀和湿法刻蚀。干法刻蚀是以等离子体进行薄膜刻蚀的技术，一般是借助等离子体中产生的粒子轰击刻蚀区，它是各向异性的刻蚀技术，即在被刻蚀的区域内，各个方向上的刻蚀速度不同，通常 Si_3N_4 、多晶硅、金属以及合金材料采用干法刻蚀技术；湿法刻蚀是将被刻蚀材料浸泡在腐蚀液内进行腐蚀的技术，这是各向同性的刻蚀方法，利用化学反应过程去除待刻蚀区域的薄膜材料，通常 SiO_2 采用湿法刻蚀技术，有时金属铝也采用湿法刻蚀技术。

实验原理

刻蚀就是用化学的、物理的或同时使用化学和物理的方法，有选择地把没有被抗蚀剂掩蔽的那一部分薄膜层除去，从而在薄膜上得到和抗蚀剂膜上完全一致的图形。刻蚀技术主要分为干法刻蚀与湿法刻蚀。干法刻蚀主要利用反应气体与等离子体进行刻蚀；湿法刻蚀主要利用化学试剂与被刻蚀材料发生化学反应进行刻蚀。

蚀刻的机制，按发生顺序可概分为：反应物接近表面、表面氧化、表面反应、生成物离开表面等过程。所以整个蚀刻，包含

反应物接近、生成物离开的扩散效应，以及化学反应两部分。理想的刻蚀应在表层中形成垂直的侧边。产生这种理想结果的刻蚀技术叫做各向异性刻蚀(anisotropic)。然而，刻蚀剂会从各个方向去掉材料，这种现象叫做各向同性(isotropic)。在从最外层刻蚀到表层底部的过程中刻蚀也会在最外表面进行，结果会在侧边形成一个斜面，这种作用因在光刻胶边缘下被底切所以称为底切。

1.干法刻蚀

1) 干法刻蚀是用等离子体进行薄膜刻蚀的技术。当气体以等离子体形式存在时，它具备两个特点：一方面等离子体中的这些气体化学活性比常态下时要强很多，根据被刻蚀材料的不同，选择合适的气体，就可以更快地与材料进行反应，实现刻蚀去除的目的；另一方面，还可以利用电场对等离子体进行引导和加速，使其具备一定能量，当其轰击被刻蚀物的表面时，会将刻蚀物材料的原子击出，从而达到利用物理上的能量转移来实现刻蚀的目的。因此，干法刻蚀是晶圆片表面物理和化学两种过程平衡的结果。

2) 干法刻蚀原理。①在低压下，反应气体在射频功率的激发下，产生电离并形成等离子体，等离子体是由带电的电子和离子组成，反应腔体中的气体在电子的撞击下，除了转变成离子外，还能吸收能量并形成大量的活性基团(radicals)；②活性反应基团和被刻蚀物质表面形成化学反应并形成挥发性的反应生成物；③反应生成物脱离被刻蚀物质表面，并被真空系统抽出腔体,干法

刻蚀原理如图 9-1 所示。

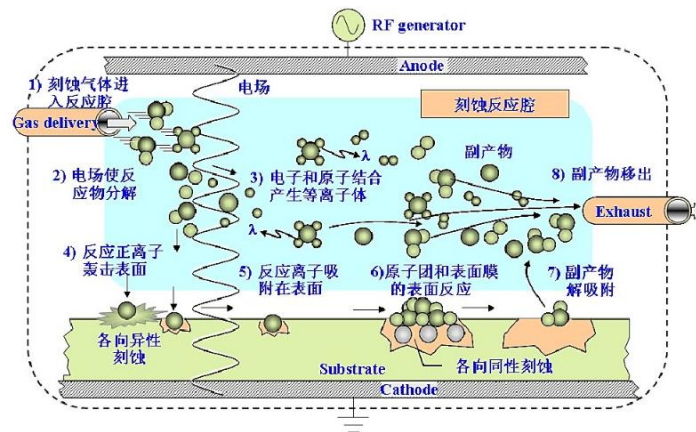


图 9-1 干法刻蚀原理

晶圆被送入反应室并且由真空系统把内部压力降低。在真空建立起来后，将反应室内充入反应气体。对于二氧化硅刻蚀，气体一般使用 CF_4 和氧的混合。电源能量供应通过在反应室中的电极创造了一个高频电场。能量场将混合气体激发成为等离子体状态。在激发状态，氟刻蚀二氧化硅并将其转化为挥发性成分由真空系统排出。

2.湿法刻蚀

湿法刻蚀是使用液体刻蚀剂沉浸的技术。晶圆沉浸于装有刻蚀剂的槽中过一定的时间，传送到冲洗设备中去除残余的酸，再进行冲洗和甩干。湿法刻蚀用于特征图形尺寸大于 3 微米的产品。低于此水平时，由于控制和精度的需要就得使用干法刻蚀。刻蚀一致性和工艺控制由附加的加热器和搅动设备来提高，例如，搅拌器或带有超声波和磁声波的槽。

1) 湿法刻蚀工艺:湿法刻蚀是将刻蚀材料浸泡在腐蚀液内进行腐蚀的技术。它是一种纯化学刻蚀，具有优良的选择性，刻蚀

完当前薄膜就会停止，而不会损坏下面一层其他材料的薄膜。由于所有的半导体湿法刻蚀都具有各向同性，所以无论是氧化层还是金属层的刻蚀，横向刻蚀的宽度都接近于垂直刻蚀的深度。这样一来，上层光刻胶的图案与下层材料上被刻蚀出的图案就会存在一定的偏差，也就无法高质量地完成图形转移和复制的工作，因此随着特征尺寸的减小，在图形转移过程中基本不再使用。

目前，湿法刻蚀一般被用于工艺流程前面的晶圆片准备、清洗等不涉及图形的环节，而在图形转移中干法刻蚀已占据主导地位。

2) 刻蚀液：被选择的刻蚀液要有可均匀地去掉晶圆表层而又不伤及下一层的材料(良好的选择性)的能力。

刻蚀时间的变化性是一个工艺参数，它受料盒和晶圆在槽中到达温度平衡的过程中温度变化的影响，和在晶圆被送入冲洗槽过程中持续刻蚀的影响。一般地，工艺被设置在最短时间并保持均匀刻蚀和高生产力。最大时间受限于光刻胶在晶圆表面的粘贴时间。图案复制的精度依靠几个工艺参数。它们包括：过刻蚀、内切、选择性和侧边的各向异性、各向同性刻蚀。当刻蚀时间过长，刻蚀温度太高，或是刻蚀剂混合物太强便会发生严重的底切。

3) 硅刻蚀：硅刻蚀是用硝酸与氢氟酸的混合水溶液进行刻蚀。这一配比规则成为控制刻蚀的一个重要的因素。在一些比率上，刻蚀硅会有放热反应。放热反应所产生的热可加速刻蚀反应，

接下来又产生更多的热，这样进行下去而导致工艺无法控制。有时醋酸和其它成分被混合进去来控制放热反应。一些器件要求在晶圆上刻蚀出槽或沟。刻蚀规则要进行调整以使刻蚀速率依靠晶圆的取向。〈111〉取向的晶圆以 45 度角刻蚀，而〈100〉取向的晶圆以“平”底刻蚀。其它取向的晶圆可得到不同形状的沟槽。多晶硅刻蚀也用基本相同的规则。

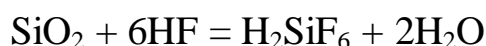
(1) 硝酸、氢氟酸与醋酸的混合液进行刻蚀：



(2) 反应原理：①硝酸将表面的硅氧化成 SiO_2 ；②氢氟酸将生成的 SiO_2 除去。

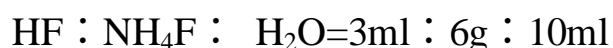
4) 二氧化硅湿法刻蚀:基本的刻蚀剂是氢氟酸(HF)，在实际中，氢氟酸(49%)与水或氟化铵与水混合。以氟化铵(NH_4F)来缓冲会加速刻蚀速率的氢离子的产生。这种刻蚀溶液称为缓冲氧化物刻蚀。它们以不同的浓度混合来达到合理的刻蚀时间。一些 BOE 公式包括一个湿化代理物用以减小刻蚀表面的张力，以使其均匀地进入小开孔区。

(1)氢氟酸可以在室温下与 SiO_2 快速反应，而不会刻蚀硅：



(2) 掩蔽膜：光刻胶、氮化硅、多晶硅。

(3) 工艺上通常使用氢氟酸缓冲液以提高可控性，配方为：



5) 氮化硅刻蚀：对于钝化层，另外一种受青睐的化合物是

氮化硅。可以用液体化学的方法来刻蚀，但是不像其它层那样容易。使用的化学品是热磷酸(180 摄氏度)。因酸液在此温度下会迅速蒸发，所以刻蚀要在一个安有冷却盖的密封回流容器中进行。主要问题是光刻胶经不起刻蚀剂的温度和高刻蚀速率。因此，需要一层二氧化硅或其它材料来阻挡刻蚀剂。这两个因素决定了氮化硅应使用干法刻蚀技术。

6) 氮化硅的刻蚀:可采用 SiO_2 作掩蔽膜，在 180°C 磷酸溶液中进行刻蚀。

7) 铝膜湿法刻蚀: 有选择的铝和铝合金刻蚀溶液基于磷酸。铝刻蚀溶液含有磷酸、硝酸、醋酸、水和湿化代理物。典型的溶液成分比例(湿化代理物较少)是 16 : 1 : 1 : 2。

(1) 刻蚀液：磷酸、硝酸、醋酸及水的混合溶液。

(2) 原理：①由硝酸与铝反应生成氧化铝;②磷酸和水分解氧化铝;③掩蔽膜：光刻胶;④温度： $35\sim 60^\circ\text{C}$ 。

实验内容

1.干法刻蚀操作流程

1) 检查设备状态。

2) 上料。

3) 输入 LOT: 点击“Program”按钮，再点击“LOT/Sequence Control”按钮。

4) “Add New Lot Name”处输入工作名称。

- 5) 选择序列号 Sequence。
- 6) 点击“Wafer”按钮，再点击“Run(Go)Button”按钮。
- 7) 本机的工艺过程为：清点晶圆片数-晶圆理片-干法刻蚀-去胶腔-冷却缓冲。
- 8) 工艺结束时报警提示，关掉“运行”按钮后才能打开上盖，取片。
- 9) 关机：最后一批次结束后，可空运转到第三个工艺流程即“辉光”前按下“运行”键，使“运行”指示灯灭。
- 10) 掉泵开关，并依次关掉射频开关按钮和面板电源开关。
- 11) 关掉控制柜内电源开关。
- 12) 刻蚀完毕后取出晶圆。

2.湿法刻蚀操作流程

- 1) 打开刻蚀水槽进料玻璃窗口。
- 2) 将晶圆放置到刻蚀水槽进料窗口中。
- 3) 选择刻蚀材料及对应的刻蚀液。
- 4) 设置刻蚀液浓度，刻蚀时间，刻蚀温度。
- 5) 点击“Start Etching”，机械臂将晶圆放入刻蚀液中进行刻蚀,刻蚀完毕后晶圆甩干。
- 6) 取出晶圆。

实验仪器

1.干法刻蚀机

系统结构由反应室、真空系统、送气系统、高频电源、匹配器等部分组成。反应室采用立式结构，射频功率通过电感耦合到反应室内，保证周边刻蚀均匀。真空系统采用主抽和预抽两路抽气，既能保证本底抽空的时间，又能使气氛扰动减小。送气系统通断气均采用电磁阀控制，工艺气体采用质量流量计控制，可靠性高，重复性好。片架可旋转，提高了刻蚀的均匀性。在泵口有一路稀释气体，它可以延长泵的维护周期和使用寿命，在排气出口加有一路 N_2 可使排放的尾气达到排放标准。射频电源的功率采用闭环自动控制。

2.湿法刻蚀机

利用溶液和薄膜进行化学反应来去除需要刻蚀的部分而达到刻蚀的目的。

系统组成：上料台、清洗箱、移栽机械手、送风与排风系统、送液系统、机柜、控制台等。

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,实验开始选择界面如图 9-2 所示。



图 9-2 实验开始选择界面

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。

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，实验操作指导界面如图 9-3 所示。

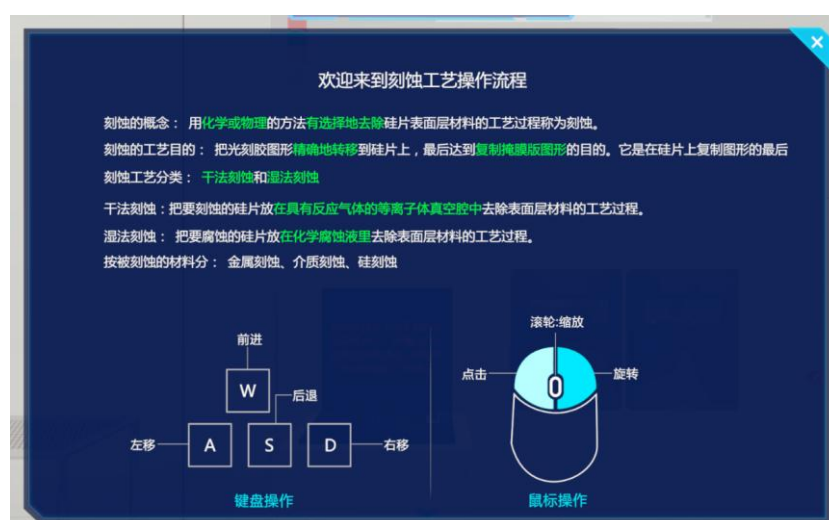


图 9-3 实验操作指导界面

实验分为干法刻蚀、湿法刻蚀。

4.干法刻蚀操作流程

- 1) 鼠标点击货架上的“晶圆盒”。
- 2) 鼠标点击“气柜”，检查设备状态。
- 3) 鼠标点击“Wafer”按钮，再点击“Load /UnloadA (B)”按钮，进行充气加压。
- 4) 鼠标点击“晶圆盒”。
- 5) 鼠标点击“Program”按钮，再点击“LOT /Sequence Control”按钮。
- 6) 在“Add New Lot Name”处输入工作名称，点击“OK”按钮确定。
- 7) 鼠标点击“Sequence Name”下的第一格，如图 9-4 所示。



图 9-4 选择 Sequence Name

- 8) 选择刻蚀 Sequence，鼠标点击“确定”按钮。
- 9) 鼠标点击“Wafer”按钮，再点击“Run (Go) Button”按钮。
- 10) 鼠标点击“Load /UnloadA (B)”按钮，进行充气加压，

加压后清点晶圆片数。

11) 鼠标点击左侧的实验步骤中的“干法刻蚀”按钮，干法刻蚀实验操作界面如图 9-5 所示。



图 9-5 干法刻蚀实验操作界面

12) 鼠标点击左侧的实验步骤中的“去胶”按钮，进行晶圆去胶操作，去胶实验操作界面如图 9-6 所示。

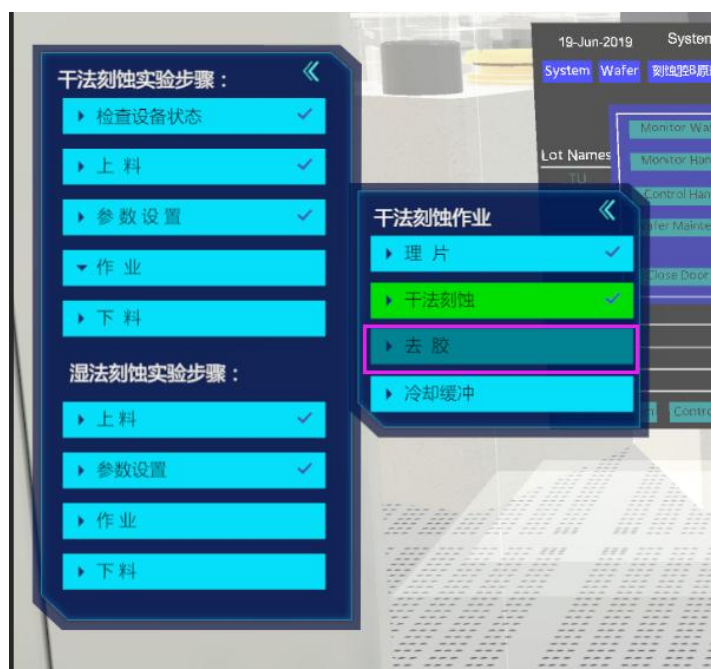


图 9-6 去胶实验操作界面

13) 鼠标点击左侧的实验步骤中的“冷却缓冲”按钮，进行晶圆冷却缓冲操作，如图 9-7 所示。



图 9-7 冷却缓冲操作

14) 鼠标点击菜单界面上的“Wafer - Load A/B 按钮”，仓门处加压，打开仓门。

15) 鼠标点击干法刻蚀好的“晶圆”，将晶圆放回到晶圆盒中，取出晶圆，如图 9-8 所示。



图 9-8 取出晶圆

16) 鼠标点击“晶圆盒”，将晶圆盒放回到货架上。

17) 完成干法刻蚀操作，干法刻蚀操作结束界面如图 9-9 所示。



图 9-9 干法刻蚀操作结束

5.湿法刻蚀操作流程

1) 漫游走到刻蚀操作台，鼠标点击操作台晶圆进料窗口，窗口打开。

2) 鼠标点击刻蚀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，加载晶圆闸如图 9-10 所示。

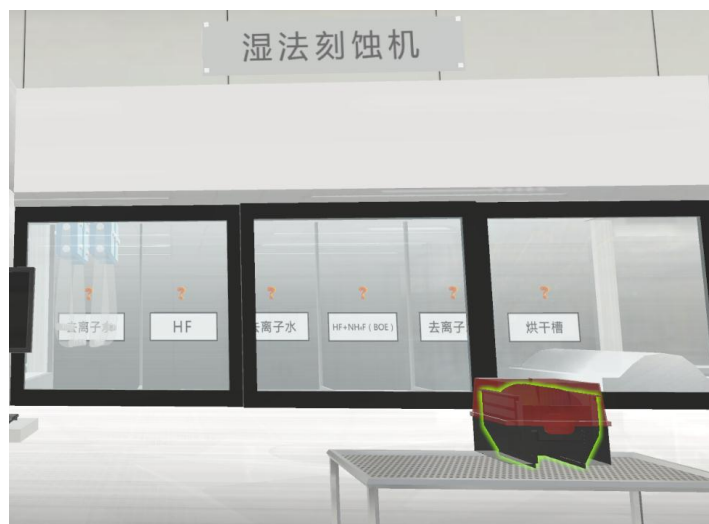


图 9-10 加载晶圆

3) 鼠标点击“Lot In”按钮，打开操作界面，操作台晶圆进料窗口关闭，点击“Lot In”按钮如图 9-11 所示。

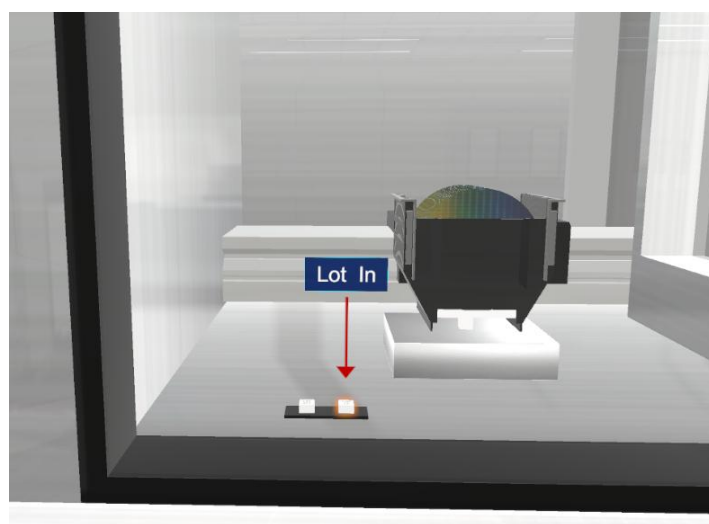


图 9-11 点击“Lot In”按钮

4) 选择刻蚀材料及对应的刻蚀液。

鼠标勾选“Front 1”，点击“ Si_3N_4 ”按钮，弹出下拉框，在下拉框中选择相应的刻蚀金属如图 9-12 所示。



图 9-12 选择相应的刻蚀金属

5) 点击“Start”按钮，开始进行湿法刻蚀，如图 9-13 所示。
刻蚀完毕后，晶圆烘干。



图 9-13 开始按钮操作

6) 刻蚀完毕后，鼠标点击“进料窗口”，打开进料窗口。
7) 鼠标点击“Lot Out”按钮，取出湿法刻蚀好的晶圆。
8) 鼠标再次点击“进料窗口”，关闭进料窗口，实验结束。
9) 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，实验结束界面如图 9-14 所示。



图 9-14 结束实验

思考题

1. 解释湿法刻蚀和干法刻蚀的方法和优缺点。
2. 列出湿法刻蚀二氧化硅，氮化硅，铝受欢迎的刻蚀剂。
3. 列出三个主要的干法刻蚀技术。
4. 写出湿法刻蚀的流程。
5. 湿法工艺中，哪些参数影响刻蚀结果？

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；