

光刻与刻蚀虚拟仿真实验

一、实验目的：

1. 了解芯片发展背景及我国芯片发展现状，掌握芯片生产流程及晶圆加工的七大核心工艺。
2. 了解光刻与刻蚀概念及作用，掌握光刻与刻蚀工艺流程及相关设备，能够对芯片的制备与加工工艺进行初步设计，并明确应予考虑的安全、健康、法律、文化及环境等制约因素；
3. 掌握光刻与刻蚀相关原理，能够对实验结果进行分析，明确光刻、刻蚀工艺要求及相关影响因素。

二、实验内容：

1. 原理学习（位置：实验教学资源——实验原理）：
包括芯片分类与七大制作工艺，光刻、刻蚀概念、原理、工艺流程和设备，光刻、刻蚀工艺的要求与影响因素等原理的文字资料学习。
2. 设备讲解（位置：实验教学资源——实验仪器设备）：
包括设备拆解和设备原理的学习。其中，设备拆解包含光刻机、等离子刻蚀机、湿法刻蚀机的互动拆解和模拟运行。设备原理包含设备结构和工作机理的文字资料。
3. 工厂漫游（位置：实验项目——工厂漫游）：
工厂漫游视频资料的学习。
4. 光刻-刻蚀实验（位置：实验项目——光刻-刻蚀实验）：
光刻-刻蚀实验含“练习模式”与“考试模式”两种模式。其中，练习模式中不记录分数，学生可随意挑选某一步骤反复练习；考试模式记录分数，学生最终需完成考试内容的学习，获得实验分数，并在考核部分导出实验报告。
5. 考试（位置：考核——考试）
限时 60 min，完成考试并提交后，自动生成客观题分数，主观题分数由教师在后台评阅给出。

三、实验原理：

（一）芯片的分类与芯片制作工艺

大部分电子设备的运行都要依赖芯片。芯片是一种把包括半导体设备及被动组件

在内的电路小型化后的产品，多制造于半导体圆晶表面上，也叫做集成电路或者微电路，英文简称 IC。芯片的分类有许多种，按照其功能、结构可以分为模拟或数字集成电路，分别用来生产、放大和处理各种模拟或数字信号；按照导电规模不同可分为双极型或单极型集成电路；按照制作工艺可分为半导体或膜集成电路；按照集成度高低分类可分为小规模（SSI）、中规模（MSI）、大规模（LSI）、超大规模（VLSI）及特大规模集成电路（ULSI）。

芯片制作完整过程包括芯片设计、晶片制作、封装制作、成本测试等环节，其中晶片制作过程最为复杂，一张芯片往往需要经历几千个步骤，历时 1 个月以上才能完成。芯片主要制作步骤包含热扩散、光刻、刻蚀、离子注入、薄膜生长、抛光、金属化七大部分。其中，光刻、刻蚀及离子注入又是重中之重。

（二）光刻与刻蚀工艺

光刻与刻蚀是实现图案从掩模版向晶圆转移的精密加工技术，分立元器件和集成电路中的各个区域，如注入区、接触窗口和压焊区等图案都是由光刻图形来确定的。在半导体制造技术中，人们通常用多晶硅栅长——“特征尺寸”来评价一个集成电路生产线的技术水平，而光刻与刻蚀技术则决定了晶圆的最小特征尺寸。其所需成本在整个硅片加工成本中几乎占三分之一，所耗时间占 40%到 50%的流片时间。光刻与刻蚀技术的研究和开发，在每一代集成电路技术的更新中扮演着技术先导的作用。

1. 光刻流程：

光刻工艺主要有 8 个步骤：化学清洗→脱水致干烘焙→底膜处理与旋转涂胶→软烘→对准与曝光→曝光后烘焙→显影→坚膜→显影检查。

（1）化学清洗

光刻前的硅片表面必须是清洁和干燥的，清洗不净将导致最终图案中有针孔、浮胶等问题，因此光刻的第一步是化学清洗。

大多数的硅片清洗工作在进入光刻工作间之前进行，污染物与清洗液对应的对应关系见表 1。SPM 利用硫酸分解颗粒，并利用双氧水去除含碳残留物，有时也可去除少量光刻胶等有机物（含量较大时碳化严重而难以去除）；APM（SC-1）利用过氧化氢的氧化机制使颗粒溶解、消散，利用氢氧化铵的氢氧根实现电学排斥，使颗粒脱落；HPM（SC-2）利用高氧化性和低 pH 使金属成为金属离子溶解于溶液中；DHF 利用氢氟酸分解二氧化硅。脱水致干烘焙在一个封闭腔内完成，以除去吸附在硅片表面的大部分水汽。一般生产中，未保证表面污染物完全去掉，典型的清洗顺序为：SPM→超纯水→DHF→超纯水→SC-1→超纯水→DHF→超纯水→SC-2。

表 1 主要洗液与可去除污染物

洗液名称	可去除的污染物
SC1 (APM) NH ₄ OH:H ₂ O ₂ : H ₂ O	微颗粒、有机物，部分金属离子
SC2 (HPM) HCl: H ₂ O ₂ : H ₂ O	金属离子
Piranha (SPM) H ₂ SO ₄ : H ₂ O ₂	颗粒、金属（不含铜）、有机物（主要是残留光刻胶）
DHF HF: H ₂ O	氧化物（自然氧化层）
BHF NH ₄ F: HF: H ₂ O	氧化物（自然氧化层）

(2) 脱水致干烘焙

干燥、疏水表面有助于提高光刻胶的粘附性，因此涂胶前需要进行脱水致干烘焙。脱水烘焙致干常用温度是 200-250 °C，此时晶圆表面自由水分和物理结合水被除去，温度过高下层金属等温度敏感物质容易变质。

(3) 旋转涂胶

脱水烘焙后、光刻胶旋涂前，硅片还常用旋涂、浸泡、喷雾和气相方法来涂六甲基二硅胺烷（HMDS）进行成膜处理，底膜可促进光刻胶与晶圆间的相互作用，提高光刻胶与硅片间的粘附性。成底膜后 60 分钟内要完成涂胶，以免潮气影响。脱水烘焙致干常用温度是 200-250 °C，此时晶圆表面自由水分和物理结合水被除去，温度过高下层金属等温度敏感物质容易变质。

涂胶工序是图形转换工艺中最初的步骤，目的是在晶圆上旋涂光刻胶而形成一层对紫外光敏感的高分子化合物，需要在黄光区进行。光刻胶主要组成有聚合物材料、感光材料、溶剂和添加剂，分类有正胶和负胶。正胶、负胶对比见表 2。

涂胶所用设备为旋涂仪。进行操作时，硅片首先被固定在一个真空载片台上，它是一个表面上有很多真空孔以便固定硅片的平的金属或聚四氟乙烯盘。取定数量的光刻胶液体滴在硅片上，然后设定旋涂仪的时间、转速，载片台即带动硅片开始高速旋转，使得光刻胶在硅片上迅速铺展成膜，从而得到均匀的光刻胶涂层，如图 1 所示。涂胶的质量直接影响到所加工器件的缺陷密度。为了保证线宽的重复性和接下去的显影时间，涂胶的关键是控制胶膜的厚度与膜厚的均匀性。涂胶厚度主要由光刻胶粘度和转速决定，同一个

样品的胶厚均匀性和不同样品间的胶厚一致性不应超过 $\pm 5\text{nm}$ (对于 $1.5\mu\text{m}$ 胶厚为 $\pm 0.3\%$)。常见的工艺为 500RMP、5s 旋转后，升至 3000-5000 RMP 旋转 30 s。常规光刻胶涂布工序的优化需要考虑滴胶速度、滴胶量、转速、环境温度和湿度等，这些因素的稳定性很重要。

表 2 光刻胶对比

	正性光刻胶（正胶）	负性光刻胶（负胶）
组成	酚醛树脂聚合物、醋酸盐类溶剂	聚异戊二烯类聚合物、二甲苯溶剂
曝光作用	曝光前感光剂与树脂交联，曝光后感光剂分解，交联被破坏。	曝光后成为相互交联的聚合物，有高抗刻蚀性。
曝光后溶解度	可溶。显影时曝光的部分溶于显影液，所得图案与掩膜版相同。	不可溶。显影时未曝光的部分溶于显影液，所得图案与掩膜版相反。
分辨率	高。聚合物的尺寸小而使分辨率高，特征尺寸 $3\mu\text{m}$ 以下时使用。	低。聚合物易吸收显影液中溶剂使得聚合物膨胀而降低分辨率。
优点	分辨率高、台阶覆盖好、对比度好	良好的粘附能力、良好的阻挡作用、感光速度快
缺点	价格昂贵、粘附性差、抗刻蚀能力差	二甲苯溶剂有毒、分辨率低



图 1 旋涂仪（左）；旋涂示意图（右）

(4) 软烘/前烘

在液态的光刻胶中，溶剂成分占 65%—85%。虽然在甩胶之后，液态的

光刻胶已经成为固态的薄膜，但仍有 10%—30% 的溶剂，容易沾污灰尘。在软烘过程中，通过在较高温度下进行烘培，可以使溶剂从光刻胶中挥发出来（前烘后溶剂含量降至 5% 左右），从而降低了灰尘的沾污。同时，这一步骤还可以减轻因高速旋转形成的薄膜应力，提高光刻胶在衬底上的附着性，从而在保证后续刻蚀过程中更好的线宽控制。前烘方法有热平板传导、红外线辐射、干燥循环热风等。软烘常用温度为 80-120 °C，时间 30-60s（热板）或 10-30min（烘箱），此时光刻胶中大部分溶剂被除去，若温度过高会导致光刻胶中的光敏物质失活，甚至使光刻胶易干裂、变脆，有些光刻胶中聚合物甚至会被破坏。

(5) 对准与曝光

对准与曝光是利用紫外线通过模版去使晶圆表面的光刻胶发生变化的过程，是生产大规模集成电路的最为核心的步骤。对准与曝光所用到的设备为光刻机，制造和维护一台光刻机需要高度的光学和电子工业基础，世界上只有少数厂家掌握，因此价格昂贵，通常在 3 千万至 5 亿美元。

① 对准：

曝光前需要进行对准，首次曝光需要对准晶向，多次曝光之间需要进行图形对准。对准晶向是指光刻掩膜版与光刻机之间的对准，二者均刻有对准标记，使标记对准即可达到光刻掩膜版与光刻机的对准。多次曝光后对准是使本次曝光后的图案与前面工艺形成的图形进行套准或达到高精度匹配。

② 曝光：

曝光是使光源经过光刻掩模版照射衬底，使接受到光照的光刻胶的光学特性发生变化。曝光的目的是要用尽可能短的时间使光刻胶充分感光，在显影后获得尽可能高的留膜率、近似垂直的光刻胶侧壁和可控的线宽。

光源选择：

光刻机最关键的部件之一是光源系统，对光源系统的要求一般有以下 3 点：（1）有适当的波长、（2）有足够的能量、（3）光能量分布均匀。其中，由于紫外光用于光刻胶的曝光是因为光刻胶与这个特定波长的光反应，因此曝光过程中要特别注意光源波长的选择。入射光波长越短，可实现的特征尺寸越小，图形分辨率越高，但能量越小，曝光所需要的时间也就越长，表 3 是曝光光源与关键尺寸关系。

光刻胶获得的曝光能量即曝光剂量，是光的强度与曝光时间的乘积，单位是 mJ/cm^2 。光强定义为单位面积的功率 (mW/cm^2)，并且在光刻胶的表面测量。对于光刻胶存在一个临界曝光剂量 D_0 ，曝光剂量小于 D_0 时，负胶在显影液中完全可溶，不会形成曝光图形；正胶则在显影液中不可溶，也不

会形成曝光图形。曝光剂量达到 D_0 后，负胶剩余膜厚随曝光剂量增大而增大；正胶剩余膜厚随曝光剂量增大而减小。当 $0 < Q < D_0$ 时，光刻胶对比度不佳，对比度是衡量光刻胶区分掩膜版中亮区与暗区的能力大小指标，可影响倾角和线宽。对比度取决于负胶留膜率与曝光剂量关系曲线中，曝光剂量取对数坐标后得到的斜率。曝光不充分，过短，无法曝透光刻胶，显影显不出，或者显影不干净，负胶的话，图形不完整，轮廓差等等。当曝光剂量达到一定值（记为 D_{100} ）以上时，负胶感光区剩余膜厚最终达到初始时负胶的厚度；正胶感光区光刻胶正好完全溶解。因此，光刻胶曝光剂量应该选择在 D_{100} 以上。

表 3 曝光光源与关键尺寸关系

光源		描述符	UV 波长 (nm)	CD 分辨率 (μm)
高压汞灯		G 线	436	0.5
		H 线	405	0.4
		I 线	365	0.35
		DUV (深紫外)	248	0.25
准分子激光	KrF	DUV	248	≤ 0.25
	ArF	193DUV	193	≤ 0.18
	F ₂	VUV (真空紫外)	157	≤ 0.15
等离子体		EUV (极紫外)	13.5	0.03

曝光方式：

- I. 接触式曝光：分辨率较高，但是容易造成掩膜版和光刻胶膜的损伤。
- II. 接近式曝光：在硅片和掩膜版之间有一个很小的间隙(10~25 μm)，可以大大减小掩膜版的损伤，分辨率较低
- III. 投影式曝光：利用透镜或反射镜将掩膜版上的图形投影到衬底上，优点：掩模版与晶片不接触，掩模不受损伤；对准是观察掩模平面上的反射图像，不存在景深问题；掩模版上的图形是通过光学技影的方法缩小，并聚焦于感光胶膜上，掩模版上可以有比实际尺寸大得多的图像(通常掩模图形的尺寸是实际尺寸的 1~10 倍)，提高了对准精度，避免了微细图形制作的困难，也减弱了灰尘微粒的影响。

缺点：投影系统光路复杂，对物镜成像能力要求高。

光刻机性能指标：

光刻机的性能由分辨率、套准精度与产率三个参数判断：

I. 分辨率：能精确转移到晶片表面光刻胶膜上图案的最小尺寸；

$$R=k \lambda /NA \quad (1)$$

其中，R 是分辨率，k 是工艺因子（0.6~0.8）， λ 是波长，NA 是曝光系统的数值孔径。减小 λ 或增加 NA 可以提高分辨率。

① 曝光系统的数值孔径

$$NA=n \sin\theta \quad (2)$$

n 为物镜与硅片间材料的折射率， θ 为光线与硅片法线夹角。NA 反映物镜收集衍射光的能力。通过增大透镜可提高 NA，NA 越大，收集衍射光能力越强，图像越陡峭。

② 焦深

焦深：可得到良好图像分辨率的焦距。

$$DOF=\lambda/2 (NA)^2 \quad (3)$$

增加 NA 提高分辨率的同时，减少 DOF，对晶圆表面平整度和工艺要求提高。

由公式（2）、（3）可见，增加 NA 会导致光刻机透镜系统工艺、成本增加，焦深减少，对晶圆表面平整度及工艺要求变高。因此通过缩短波长，可有效实现的特征尺寸减小、分辨率提高。但波长减小后光强小，曝光时间增长，因此要根据特征尺寸合理选择曝光光源。

II. 套准精度：后续掩模版与先前掩模版刻在硅片上的图形相互对准或匹配的程度；

III. 产率：对一给定的掩模版，每小时能曝光完成的晶片数量。

（6） 曝光后烘焙(PEB)

曝光后的硅片从曝光系统转移到硅片轨道系统后，需要进行短时间的曝光后烘焙以促进关键光刻胶的化学反应。曝光后烘焙所用温度一般在光刻胶玻璃转化温度 T_g 以上，此时光刻胶分子发生热运动，过曝光和欠曝光的光刻胶分子可以发生重排，从而平衡驻波效应、平滑光刻胶侧墙，最终达到提高分辨率的目的。曝光后烘焙对于 CA DUV 光刻胶（一种含保护化学成分使其不在显影液中溶解的光刻胶）非常重要，因为该过程可以引起酸催化的去保护反应。即通过曝光后烘焙，光生酸去除树脂中的保护成分，使光刻胶能够溶于显影液。由此可见，这一过程会影响关键尺寸大小，因此为减小关键尺

寸的不稳定性，热板的温度值变化一般为 ± 0.1 °C。曝光后烘焙所用温度一般比软烘温度高 10-15 °C。

(7) 显影

在显影液中，正光刻胶的感光区、负光刻胶的非感光区，会溶解于显影液中，从而使曝光后在光刻胶层中形成的潜在图形在光刻胶上显现出来，形成三维光刻胶图形。显影后所留下的光刻胶图形将在后续的刻蚀或离子注入工艺中作为掩膜，因此，显影也是一步重要工艺。光刻胶显影的早期方法是将盒硅片面定浸设在是影液中。在大规模生产的今天，此方法已不再适用。目前最常用的显影技术为喷雾显影和旋覆浸没显影。

显影中进行的是选择性溶解的过程，最重要的是曝光区和未曝光区之间溶解率的比值(DR)，商用正胶有大于 1000 的 DR 比，在曝光区溶解速率为 3000nm/min，在未曝光区只有几 nm/min。显影液的浓度、温度、均匀度，光刻胶的膜厚、前烘条件和曝光量等都会影响显影速率。为了提高分辨率，几乎每一种光刻胶都有专门的显影液，以保证高质量的显影效果。正胶显影液是用水稀释的强碱，即水性显影液。传统的正胶显影液为 NaOH 或 KOH 与去离子水的混合液，但是其中的金属离子可能造成污染，对于高特性集成电路是比较难接受的。TMAH 避免了金属离子玷污，清洗液也只用去离子水即可。负胶显影液通常为二甲苯，用于溶解未曝光的负胶。负胶显影后的清洗液也需要为一种有机溶剂，如丁基醋酸盐、乙醇或三氯乙烯。

清洗液去除显影液之前，显影液一直与光刻胶反应，因此显影时间不当会造成光刻胶的过腐蚀，导致 CD 值发生严重偏差。一般的显影时间为 20-30 s，过短会造成不完全显影、显影不充分、不完全显影或胶丝，过长会造成光刻胶过显影、钻蚀、软化或膨胀等问题。实际生产中也可以通过检测在线溶解率 (DRM) 对真实显影时间进行检测。

(8) 坚膜/后烘

坚膜过程不但可以去除显影后胶层内残留的溶剂，消除由于显影液的浸泡引起的胶膜软化、溶胀现象，还可以通过热熔效应使光刻胶与硅片之间的接触面积达到最大，增强胶膜附着能力、减少光刻胶膜中的针孔，从而提高随后刻蚀和离子注入过程中的抗蚀能力。

坚膜所用温度要高于前烘和曝光后烘烤温度，较高的坚膜温度可使坚膜后光刻胶中的溶剂含量更少。但过高的坚膜温度不仅会增加去胶时的困难，还会增加光刻胶内部的拉伸应力使附着性变差，甚至还可能使光刻胶发生流动变形从而影响分辨率，因此必须控制在适当温度范围。

坚膜后还需要通过光学稳定使光刻胶产生均匀的交叉链接，提高光刻胶的聚合度及稳定性。光学稳定不但使光刻胶在刻蚀过程中的抗蚀得到进一步增强，而且还可以减少离子注入过程中从光刻胶中逸出的气体，防止在光刻层中形成气泡。

(9) 显影检查

坚膜后的圆晶将被进行检测，目的是为了查找光刻胶中成形图形的缺陷。对带有光刻胶图形缺陷的硅片进行刻蚀或离子注入会使硅片报废，因此在刻蚀或离子注入工艺之前必须进行检查以鉴别并除去有缺陷的硅片。显影检查内容包括对准精度、关键尺寸及表面缺陷（刮痕、针孔、浮胶、污染物等）。检查合格的圆晶进入后续刻蚀等流程，不合格的圆晶在清洗后进入最初流程。光刻是芯片生产过程中唯一可以进行返工的步骤，可接受的返工率要 $<10\%$ 。

显影检查可以采用光学显微镜或扫描电子显微镜。现在的制造厂中，用于显影后检查的自动检查设备已经很普遍，特别是深亚微米光刻，因为深亚微米中的缺陷用光学显微镜已很难发现。

2. 光刻工艺要求:

(1) 高分辨率

分辨率是将硅片上两个邻近的特征图形区分开来的能力，即对光刻工艺中可以达到的最小光刻图形尺寸的一种描述，是光刻精度和清晰度的标志之一，通常以每毫米内能刻蚀出可分辨的最多线条数目来表示。随着集成电路的集成度提高，加工的线条越来越细，对分辨率的要求也越来越高。

(2) 高灵敏度的光刻胶

灵敏度是指光刻胶感光的速率。为了提高产量，要求光刻周期越短越好，这就要求曝光时间越短越好，也就要求高灵敏度。

(3) 低缺陷密度

缺陷会使电路失效，因此应该尽量减少缺陷。

(4) 精密的套刻精度

集成电路制作需要十多次甚至几十次光刻，每次光刻都要相互套准。由于图形的特征尺寸在亚微米数量级上，因此对套刻要求很高，要求套刻误差在特征尺寸的 10% 左右。

(5) 可对大尺寸硅片进行光刻加工

大尺寸硅片加工提高了经济效益，但是要在大面积的晶圆上实现均匀的胶膜涂覆、均匀感光、均匀显影就比较困难。一般高温会引起晶圆的形变，需要对周围环境的温度控制要求十分严格，否则会影响光刻质量

3. 刻蚀:

在光刻过程中，图案从掩膜版转移到晶圆表面的光刻胶薄膜中。而刻蚀则是以光刻胶膜为新的掩膜版，将没有被光刻胶覆盖和保护的那部分除掉，使光刻胶上的图形转移到其下层材料上，将图案真正留在晶圆中。刻蚀对于器件的电学性能十分重要。如果刻蚀过程中出现失误，将造成难以恢复的硅片报废，因此必须进行严格的工艺流程控制。

刻蚀的方法分为干法刻蚀与湿法刻蚀，如图 2。湿法刻蚀是把硅片放在化学腐蚀液里，有选择地去除表面层材料；干法刻蚀是把硅片放在气体等离子体中，有选择地去除表面层材料。若按照被刻蚀的材料，干法刻蚀可以分为金属刻蚀、介质刻蚀和硅刻蚀，其中介质刻蚀使用量最大。若按照反应原理来划分，干法刻蚀又可分为：

(1) 物理性刻蚀，又称离子束溅射刻蚀，原理是使带能粒子在强电场下加速，这些带能粒子通过溅射刻蚀作用去除未被保护的硅片表面材料。

(2) 化学性刻蚀，又称等离子体刻蚀，纯化学刻蚀作用中，通过等离子体产生的自由基和反应原子与硅片表面的物质发生化学反应达到刻蚀的效果。

(3) 物理化学性刻蚀，即反应离子刻蚀，为物理刻蚀与化学刻蚀混合作用。这种物理和化学混合的作用机理结合了两种作用的优点，能获得较好的线宽控制并有较好的选择比，因而在大多数干法刻蚀中多采用反应离子刻蚀。

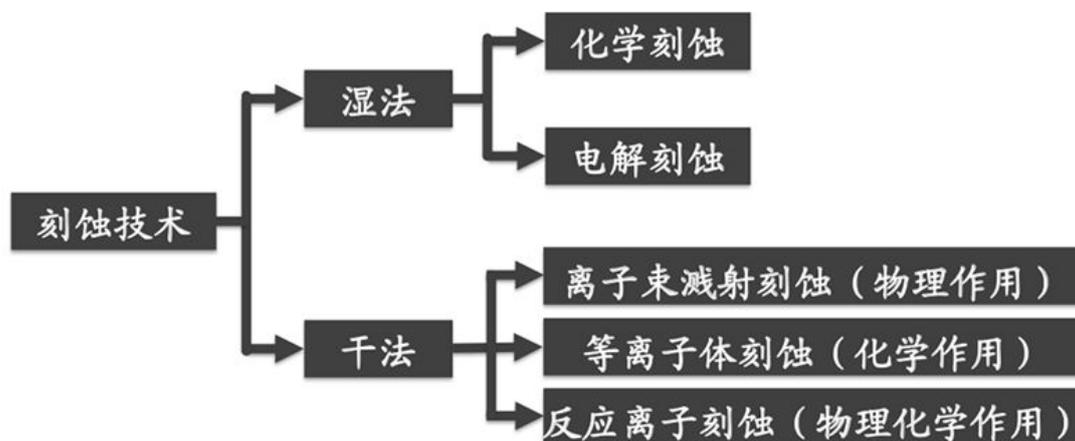


图 2 刻蚀方法分类

湿法刻蚀是各向同性刻蚀，即侧向与纵向腐蚀速度相同，不能实现图形的精确转移，适用于特征尺寸 $\geq 3\mu\text{m}$ 的情况的过程。干法刻蚀是把硅片放在气体等离子体中，有选择地去除表面层材料。干法刻蚀是各向异性刻蚀，即侧向腐蚀速度远远小于纵向腐蚀速度，使得侧向几乎不被腐蚀，能实现图形的精确转移，是集成电路刻蚀工艺的主流技术（见图 3）。相比于湿法刻蚀，

干法刻蚀对侧壁剖面控制良好，从而对特征尺寸可达到更好的控制。此外，干法刻蚀还能减少光刻胶脱落或粘附问题，片内、片间、批间的刻蚀均匀性良好，化学品使用费用也更低。但是，干法刻蚀也存在着对下层材料的刻蚀选择比较差、等离子体诱导损伤、设备昂贵等问题。

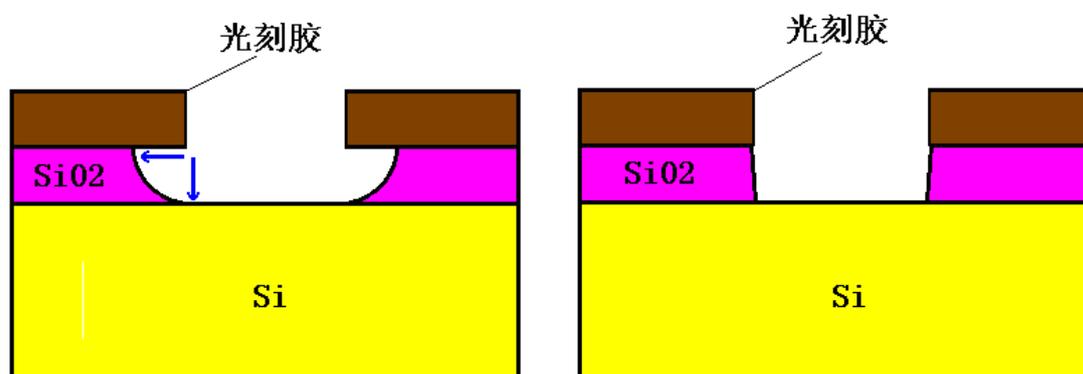


图 3 各向同性刻蚀剖面（左）；各向异性刻蚀剖面（右）

4. 刻蚀工艺要求

(1) 刻蚀速率

刻蚀速率是指刻蚀过程中去除表面层材料的速度。刻蚀速率 = $\Delta d/t$ ，其中， Δd 为去掉薄层材料的厚度（单位：埃/分钟 或 纳米/分钟）， t 为刻蚀时间（单位：分钟）。

(2) 刻蚀偏差

刻蚀偏差是指刻蚀以后线宽或关键尺寸的变化。刻蚀偏差 = $W_a - W_b$ ，其中， W_a 为线宽或关键尺寸， W_b 为实际尺寸。

(3) 选择比

选择比是指在同一刻蚀条件下，刻蚀一种材料对另一种材料的刻蚀速率之比。高选择比意味着只去除想要刻蚀掉的膜层材料，而对其下层材料和光刻胶不刻蚀。

例：SiO₂ 与光刻胶的选择比 = $(\Delta d_{\text{SiO}_2}/t_1) \div (\Delta d_{\text{光刻胶}}/t_1) = \Delta d_{\text{SiO}_2}/\Delta d_{\text{光刻胶}}$ ，其中， Δd_{SiO_2} 和 $\Delta d_{\text{光刻胶}}$ 分别为二者的刻蚀深度。

(4) 均匀性

刻蚀均匀性是指刻蚀速率在整个硅片或整批硅片上的一致性情况。非均匀性刻蚀会产生额外的过刻蚀。

(5) 刻蚀剖面

刻蚀剖面是指被刻蚀图形的侧壁形状。

除以上 5 个参数外，刻蚀后留下的污染物、残留物和等离子体诱导损伤等情况也是判断刻蚀效果的好坏的参考因素。

5. 光刻胶的去除：

光刻胶的主要功能是在整个区域进行化学或机械处理工艺时，保护光刻胶下的衬底部分。刻蚀或离子注入之后，已经不再需要光刻胶作保护层，可以将其除去，这一步骤简称去胶。只有那些高温稳定的光刻胶，例如光敏感聚酰亚胺，可以作为中间介质或缓冲涂层而留在器件上。

去胶的方法可分为湿法去胶和干法去胶。干法去胶或利用臭氧、等离子体将光刻胶剥除，或利用紫外线将光刻胶分解。湿法去胶则包括无机溶剂去胶和有机溶剂去胶两种，为避免对被处理表面的任何损伤，湿法去胶应当使用低温下温和和有效的化学方法，超声波的应用也可以满足上述要求并增强剥离效能。

(1) 无机溶剂去胶：通过使用一些无机溶剂，将光刻胶这种有机物中的碳元素氧化为二氧化碳，进而而将其除去。SiO₂、SiN、多晶硅等非金属材料一般就可采用浓硫酸去胶。由于浓硫酸去胶时碳被还原析出，微小的碳粒会污染衬底表面，因而必须在浓硫酸中加入 H₂O₂ 等强氧化剂，使碳被氧化为 CO₂ 溢出。浓硫酸与 H₂O₂ 的比值为 3:1。

(2) 有机溶剂去胶：利用有机溶剂除去光刻胶。酸性腐蚀液对铝、铬等金属具有较强的腐蚀作用，因此金属衬底的去胶需要专门的有机去胶剂。通常这类去胶剂中加入了三氯乙烯作为发泡剂，因此去胶后要用三氯乙烯和甲醇进行中间清洗，由于去胶液和三氯乙烯都是有毒物质，处理比较困难

相比于湿法去胶，干法去胶有操作简单安全、过程中引入污染的可能性小、能与干法腐蚀在同一设备中进行、不损伤下层衬底等优点。此外，由于腐蚀问题、剥离液与金属表面的相容性问题，干法刻蚀也具有一定应用优势。然而，干法刻蚀对于器件表面的损坏也是要解决的问题。

四、实验材料及设备：

(虚拟仿真平台网址：<http://pnew.whxysz.net/>)

1. 实验药品：晶圆，清洗液，底胶，光刻胶，刻蚀气体。
2. 实验耗材和仪器设备：光刻机、刻蚀机、清洗设备、涂胶显影机、烘箱、热板、旋涂仪、显微镜等。

五、实验步骤:

1. 化学清洗（**随机情境**）：根据污染物选择相应洗液。
2. 脱水致干：将晶圆置于烘箱中，设置参数，进行脱水致干烘焙。
3. 涂胶（**随机情境**）：根据掩膜版形状与光刻期望图案选择涂胶顺序、光刻胶种类，根据光刻胶膜层厚度选择粘度及旋涂工艺。
4. 软烘/前烘：将晶圆置于烘箱中，设置参数，进行软烘。
5. 掩膜光刻（**随机情境**）：利用光刻机进行对准与曝光，根据图案关键尺寸选择光源情况并设置曝光剂量。
6. 曝光后烘焙(PEB)：将晶圆置于烘箱中，设置参数，进行烘焙。
7. 显影：将晶圆置于涂胶显影机中喷雾显影，根据正胶、负胶选择相应的显影液、清洗液和显影时间。
8. 坚膜/后烘：将晶圆置于烘箱中，设置参数，进行坚膜。
9. 晶圆检查（**自检**）：利用显微镜检查图案是否正确，确认返厂或进行下步刻蚀。
10. 刻蚀（**随机情境**）：将晶圆置于刻蚀机中，根据待刻蚀层物质确认刻蚀气体，并根据刻蚀探测器信号变化确认刻蚀终点。
11. 去胶：选择去胶设备（等离子去胶机或超声清洗机），根据光刻胶下层膜层组成选择合适洗液进行去胶。
12. 晶圆检查（**自检**）：将晶圆置于显微镜下检查，查看图案是否正确以及光刻胶去除情况。

六、数据处理与分析:

（1）结果分析与改进：实验报告由系统自动生成，请对实验中出现的問題进行分析，并给出改进方案。

说明 1:

每次实验中，系统随机设置晶圆污染情况，光刻胶厚度，目标图案形状、尺寸，待刻蚀物质等实验情景和实验目标，学生根据特定实验目标自由探索，开展实验。学生实验过程不同，实验结果不同。

说明 2:

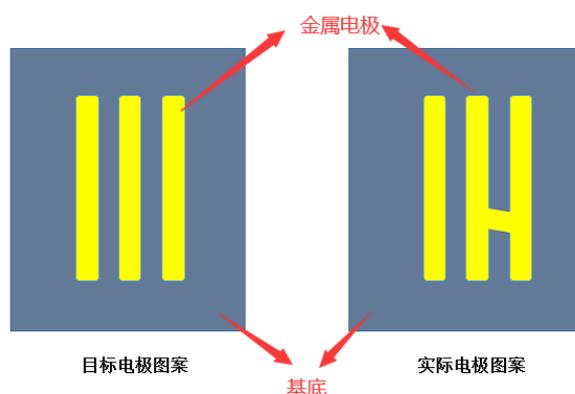
“练习模式”中，问题回答错误后立即给出反馈和答案解析，使学生能够明确知识点，及时纠正错误。“考试模式”中，问题回答错误立即给出反馈，但不会给出答案解析，学生需要结合晶圆检查结果、实验记录和所学知识，在本部分

报告中分析问题原因并给出正确答案。

说明 3:

实验流程中设置两次晶圆检查，学生根据观察结果自行发现错误，决定返厂（光刻工艺发现错误，去胶并返回实验第一步骤）或继续进行下一步实验。系统记录相关操作并评分。若出现错误，学生需要结合晶圆检查结果、实验记录和所学知识，在本部分报告中分析问题原因并给出改进方案。

（2）性能分析：若制作电极时发生以下状况，请分析其存在的问题，问题产生原因，并描述其对器件性能的影响。



七、注意事项:

1. 涂胶过程应始终在超净环境中进行，同时光刻胶溶液中不能含有空气，以免在光刻过程中引入缺陷。
2. 注意光刻后的显影检查。

八、思考题:

光刻后的显影检查中的常见问题及影响因素有哪些，如何进行改善？