

晶体生长、晶圆片制造实验

实验简介

单晶硅是一种比较活泼的非金属元素，是晶体材料的重要组成部分，处于新材料发展的前沿。其主要用途是用作半导体材料和利用太阳能进行光伏发电、供热等。单晶硅可以用于二极管级、整流器件级、电路级以及太阳能电池级单晶产品的生产和深加工制造，其后续产品集成电路和半导体分离器件已广泛应用于各个领域，在军事电子设备中也占有重要地位。

各种晶体材料，特别是以单晶硅为代表的高科技附加值材料及其相关高技术产业的发展，成为当代信息技术产业的支柱，并使信息产业成为全球经济发展中增长最快的先导产业。单晶硅作为一种极具潜能，亟待开发利用的高科技资源，正引起越来越多的关注和重视。

实验原理

熔融的单质硅在凝固时硅原子以金刚石晶格排列成许多晶核，如果这些晶核生长成晶面取向相同的晶粒，则这些晶粒平行结合起来便结晶成单晶硅。

1.单晶硅制备方法

单晶硅的制法通常是先制得多晶硅或无定形硅，然后用直拉法或悬浮区熔法从熔体中生长出棒状单晶硅。按晶体生长方法的不同，分为直拉法(CZ)、区熔法(FZ)和外延法。直拉法、区熔法

生长单晶硅棒材，外延法生长单晶硅薄膜。

1) 直拉法。

在熔化的硅熔液中接种有一定晶向的籽晶，通过引细晶的 Dash 技术消除原生位错，利用结晶前沿的过冷度驱动硅原子按顺序排列在固液界面的硅固体上，形成单晶。

现有的 CZ 都采用氩气气氛减压拉晶。利用通入惰性气体氩气，结合真空泵的抽气，形成一个减压气氛下的氩气流动。氩气流带走高温熔融硅挥发的氧化物，以防止氧化物颗粒掉进硅熔液，进而运动到固液界面，破坏单晶原子排列的一致性。其优点是晶体被拉出液面不与器壁接触，不受容器限制，因此晶体中应力小，同时又能防止器壁玷污或接触所可能引起的杂乱晶核而形成多晶。此法制成的单晶硅完整性好，直径和长度都可以很大，生长速率也高。所用坩埚必须由不污染熔体的材料制成。因此，一些化学性活泼或熔点极高的材料，由于没有合适的坩埚，而不能用此法制备单晶体，而要改用区熔法或其他方法晶体生长。直拉法生长的单晶硅主要用于半导体集成电路、二极管、外延片衬底。

2) 区熔法。

区熔法可用于制备单晶和提纯材料,还可得到均匀的杂质分布。这种技术可用于生产纯度很高的半导体、金属、合金、无机和有机化合物晶体。在用区熔法制备单晶硅的过程中，往往是将区熔提纯与制备单晶硅结合在一起,这样能生长出质量较好的中高阻单晶硅。区熔单晶炉主要包括：双层水冷炉室、长方形钢化

玻璃观察窗、上轴(夹多晶棒)、下轴(安放籽晶)、导轨、机械传送装置、基座、高频发生器和高频加热线圈、系统控制柜真空系统及气体供给控制系统等。

2.加工工艺

在晶体生长中，晶体结构和电学性能的一致性及污染问题是一个挑战，这些挑战要求几乎每一个参数都有更高的工艺规格。与挑战并进和提供更大直径的晶圆是芯片制造不断进步的关键。

直拉法制备单晶硅的具体工艺流程包括：拆炉→安装热场→加料→熔化→缩颈生长→放肩生长→等径生长→尾部生长→冷却→取晶等步骤，直拉法制备单晶硅步骤如图 1-1 所示。

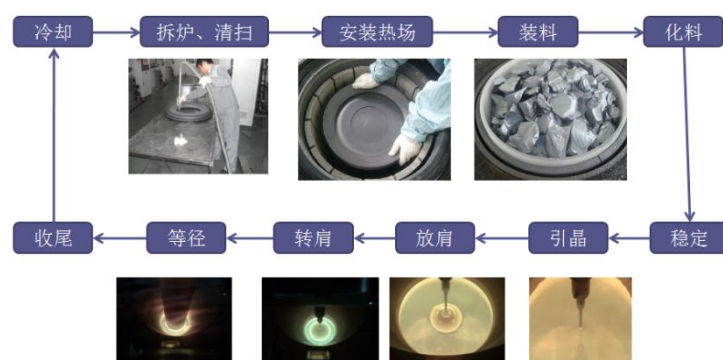


图 1-1 直拉法制备单晶硅步骤

1) 加料：将多晶硅原料及杂质放入石英坩埚内，杂质的种类依电阻的 N 型或 P 型而定。杂质种类有硼、磷、锑、砷。

2) 熔化：加完多晶硅原料后，关闭单晶炉并抽成真空，然后充入高纯氩气，使炉内维持在一定压力范围内，打开石墨加热器电源，加热至熔化温度(1420℃)以上，将多晶硅原料熔化。

3) 缩颈生长：当硅熔体的温度稳定之后，将籽晶慢慢浸入

硅熔体中。籽晶与硅熔体场接触时的热应力，会使籽晶产生位错，这些位错必须利用缩颈生长使之消失掉。缩颈生长是将籽晶快速向上提升，使长出的籽晶的直径缩小到一定大小(4-6mm)，由于位错线与生长轴成一个交角，只要缩颈够长，位错便能长出晶体表面，产生零位错的晶体。

4) 放肩生长：长完细颈之后，须降低温度与拉速，使得晶体的直径渐渐增大到所需的大小。

5) 等径生长：长完细颈和肩部之后，借着拉速与温度的不断调整，可使晶棒直径维持在正负 2mm 之间，这段直径固定的部分即称为等径部分。单晶硅片取自于等径部分。

6) 尾部生长：在长完等径部分之后，如果立刻将晶棒与液面分开，那么热应力将使得晶棒出现位错与滑移线。为了避免此问题的发生，必须将晶棒的直径慢慢缩小，直到成一尖点而与液面分开。这一过程称为尾部生长。长完的晶棒被升至上炉室冷却一段时间后取出，即完成一次生长周期。

3.晶圆的加工

单晶硅圆片按其直径分为 6 英寸、8 英寸、12 英寸(300 毫米)及 18 英寸(450 毫米)等。直径越大的圆片，所能刻制的集成电路越多，芯片的成本也就越低。但大尺寸晶片对材料和技术的要求也越高。

拉制单晶硅棒以后，需要经过一系列的加工操作最终生产出可作为衬底的晶圆，生产晶圆加工操作 具体流程如图 1-2 所示。

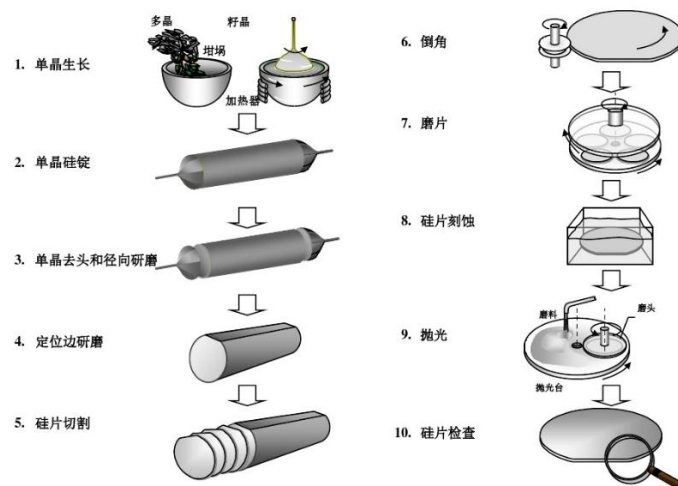


图 1-2 生产晶圆加工操作

1) 晶棒裁切与检测(cutting & inspection): 将长成的晶棒去掉直径偏小的头、尾部分, 并对尺寸进行检测, 以决定下一步加工的工艺参数。

2) 外径研磨(surface grinding & shaping): 由于在晶棒成长过程中, 其外径尺寸和圆度均有一定偏差, 其外圆柱面也凹凸不平, 所以必须对外径进行修整、研磨, 使其尺寸、形状误差均小于允许偏差。

3) 切片(wire saw slicing): 由于硅的硬度非常大, 所以在本工序里, 采用环状、其内径边缘镶嵌有钻石颗粒的薄片锯片将晶棒切割成一片片薄片。

4) 圆边(edge profiling): 由于刚切下来的晶片外边缘很锋利, 硅单晶又是脆性材料, 为避免边角崩裂影响晶片强度、破坏晶片表面光洁和对后工序带来污染颗粒, 必须用专用的电脑控制设备自动修整晶片边缘形状和外径尺寸。

5) 研磨(lapping): 研磨的目的在于去掉切割时在晶片表面产

生的锯痕和破损，使晶片表面达到所要求的光洁度。

6) 蚀刻(etching): 以化学蚀刻的方法，去掉经上几道工序加工后在晶片表面因加工应力而产生的一层损伤层。晶圆经前述加工制程后，表面因加工应力而形成一层损伤层(damaged layer)，在抛光之前必须以化学蚀刻的方式予以去除。蚀刻液可分为酸性与碱性两种。

酸腐蚀：等方向性腐蚀。腐蚀液由不同比例的硝酸、氢氟酸及缓冲液配制而成。硝酸起氧化作用，氢氟酸用来溶解二氧化硅，体积比为 5:1。缓冲液具有缓冲腐蚀速率的作用，还有改善晶片表面的湿化程度，避免产生不规则的腐蚀结构。缓冲液一般采用磷酸或醋酸，醋酸极易挥发，在腐蚀液中的浓度不易稳定，磷酸会降低腐蚀速率。

碱腐蚀：是一种非等方向性的腐蚀，腐蚀速率与晶片的结晶方向有关。 $\{111\}$ 晶面具有较小的自由基不易被-OH 腐蚀。腐蚀剂为 KOH 或者 NaOH。KOH 的浓度控制在 30%~50%，反应温度为 60~120℃。腐蚀速率随浓度的增加而增加，达到最大值后，会随 KOH 浓度的增加而减小。浓度较高时，不仅有利于控制腐蚀速率，因黏度较高，也使晶片上比较不易留下斑点。碱腐蚀与晶片表面的机械损伤程度有关，一旦损伤层完全去除，腐蚀速率就会变缓慢。

7) 抛光(polishing): 对晶片的边缘和表面进行抛光处理，一来进一步去掉附着在晶片上的微粒，二来获得极佳的表面平整度，

以利于后面所要讲到的晶圆处理工序加工。抛光是利用机械、化学或电化学的作用，使工件表面粗糙度降低，以获得光亮、平整表面的加工方法。

晶圆的抛光，依制程可区分为边缘抛光与表面抛光两种。

边缘抛光的主要目的在于降低微粒(**particle**)附着于晶圆的可能性，并使晶圆具备较佳的机械强度，但需要的设备昂贵且技术层面较高，除非客户要求，否则不进行本制程。

表面抛光是晶圆加工处理的最后一个步骤，移除晶圆表面厚度 10~20 微米，其目的在于改善前述制程中遗留下的微缺陷，并取得局部平坦度的极佳化，以满足 IC 制程的要求。基本上本制程为化学—机械的反应机制，由研磨剂中的 NaOH、KOH、NH₄OH 腐蚀晶圆的最表层，由机械摩擦作用提供腐蚀的动力来源。

8)清洗(**cleaning**): 将加工完成的晶片进行最后的彻底清洗、风干。

9) 包装(**packing**): 将成品用柔性材料分隔、包裹、装箱，准备发往以下的芯片制造车间或出厂发给订货客户。

现今半导体业所使用的硅晶圆，大多以{100}硅晶圆为主。其可依导电杂质之种类，再分为 P 型与 N 型。在晶圆出厂时，提供所需的规格说明如表 1-1 所示。

表 1-1 晶圆出厂规格说明

项目	说明
----	----

晶面	{100}、{111}、{110} $\pm 1^\circ$
外径(吋)	6、8、12
厚度(微米)	300 ~ 450 450 ~ 600 550 ~ 650 600 ~ 750(± 25)
杂质	p 型、n 型
阻值(Ω -cm)	0.01 (低阻值) ~ 100 (高阻值)
制作方式	CZ、FZ (高阻值)
抛光面	单面、双面
平坦度(埃)	300 ~ 3000

实验内容

1.拉制单晶硅棒

1) 配料：按照生产计划对每炉原料进行配重和计算，使产品的质量参数达到预期要求；将原、辅料分发至炉前。

2) 装炉：按热系统设计方案装配系统零部件，同时将多晶硅原材料、掺杂剂放入单晶炉承载原料的容器石英坩埚内。

3) 抽真空：启动真空泵对单晶炉抽真空，在规定时间内达到设备最低真空、压升率要求。

4) 加热：给单晶炉通入氩气后通电，使单晶炉设备真空符合拉晶要求，调节档位进行加热并化硅。

5) 化硅：在规定加热功率下熔化硅料，调节温度在硅的熔点 1412°C 以上进行化料，将炉料全部熔化完毕，并使炉内温度趋于稳定。

6) 接种：待炉内温度稳定到适合引晶的温度时，将籽晶慢慢接触熔硅液面上方，使之预热后籽晶将自动吸附在熔硅液面，待光圈稳定后提升拉速，进入下一工艺流程，接种时温度尽可能高一点。

7) 引晶：根据炉内的温度，按一定的速度变化范围提升籽晶，按规定长度要求生长规定直径的细径单晶。

8) 放肩：缩颈长度、细直径单晶符合要求后，降低拉速和控制温度使单晶直径向径向方向逐渐生长，并达到所需的直径尺寸要求。在放肩快结束时，校正 CCD 上的晶体直径读数与实际值一致。

9) 转肩：确保晶体直径在到规定范围内生长，控制直径，使晶体由横向生长变向纵向生长。提高拉速使晶体向纵向方向生长，达到晶体直径在规定范围内等径生长。

10) 等径：放肩符合要求后，晶体生长步长清零并给定合适的过跟比，待直径趋于稳定后，投入计算机控制其自动生长，晶体将在自动条件下生长到规定长度。

11) 收尾：在长晶的最后阶段，为防止热冲击造成单晶等径部分出现滑移线而进行的逐步缩小直径的过程。当坩埚内炉料剩余到一定程度之后，通过收尾控制使单晶直径缓慢变细，直至排除位错后与液面脱离。

12) 停炉：根据工艺要求逐次降温，同时使计算机的参数清零，停止坩埚旋转，使用氩气冷却保护，待炉内发暗后停止通入

氩气，抽真空并记录，关闭球阀，记录压升率，给下炉开炉提供数据。

13) 清炉：取出晶体，清理单晶炉设备及热系统工件的表面杂质、附着物及缝隙处的杂质、附着物，经清理后设备应符合投料开炉的要求。

2.切断

使用金刚石单线锯机将晶棒进行分段。

- 1) 打开单线锯机箱盖。
- 2) 放置晶棒。
- 3) 关闭单线锯机箱盖。
- 4) 打开金刚石单线锯机电源。
- 5) 开启冷却液。
- 6) 开始进行切割。
- 7) 关闭金刚石单线锯机。
- 8) 关闭冷却液。
- 9) 切割完毕后，再次打开单线锯机箱盖。
- 10) 取下晶棒。

3.外径滚磨、开槽

- 1) 根据单晶的长度，调整尾座位置，固定限位。
- 2) 找正：测量加工工件长短以确定尾座的位置，查看夹具是否合适、工件两端是否平整。将工件架架好，检查夹具的松紧程度是否合适。

3) 确认夹紧后将机器的防护罩装好, 将所有工具放回原位, 检查移动部位有无障碍物。

4) 查看指示灯是否正常, 然后按操作规程启动设备, 当设备正常运行 1 分钟后, 开启冷却液, 调整冷却液水流的大小和砂轮之间的距离, 以间距 6 公分为宜。

5) 确认一切正常后方可启动机器, 开始滚磨。

6) 滚磨工作结束后, 停水、停电。

7) 取出晶棒。

4.切片

采用内径锯进行切片, 其锯片是一环状薄叶片, 内径边缘镶有钻石颗粒。切片前预先在晶棒上粘贴一块石墨板, 不仅有利于切片的夹持, 更可以避免在最后切断阶段锯片离开晶棒时所造成的破裂。晶圆切片的厚度、弓形度(bow)及挠屈度(warp)等特性为制程管制要点。影响晶圆质量的因素除了切割机台本身的稳定性与设计外, 锯片的张力状况及钻石锐利度的保持都有很大的影响。

1) 领取晶棒: 需要核对随工单、晶体编号、长度、有无崩边, 未倒角裂纹是否和随工单一样。

2) 先把晶棒表面的胶刮干净, 再用酒精把表面擦干净, 注意晶拖两侧的胶要刮干净, 在燕尾槽内涂抹润滑油脂。

3) 把晶棒装到夹具上, 然后把晶棒下表面再次擦拭干净, 用装卸棒起升车装到线切割机上。

4) 打开主电源开关。

- 5) 打开操作系统。
- 6) 打开砂浆，看砂浆是否连续。
- 7) 关门，开始双向热机 10~30 分钟，对应程序等待 10 秒。
- 8) 停止热机，检查是否有跳线，如有跳线则处理跳线后再次热机，直到没有跳线为止。
- 9) 进行切片。
- 10) 停机，先关闭操作系统，再关闭主电源开关。
- 11) 取出晶圆。

5.倒角

刚切好的晶圆，其边缘垂直于切割平面呈锐利的直角。由于单晶硅硬脆的材料特性，此角极易崩裂，不但影响晶圆强度，更成为制程中污染微粒的来源，且在后续的半导体制程中，未经处理的晶圆边缘也会影响光组与磊晶层之间的厚度，故须以专用的电脑控制设备自动修整切片晶圆的边缘形状与外径尺寸。

倒角机操作面板分为控制按钮和显示器两大部分，可以实现参数设定、各个动作控制、自动研磨的控制等。

- 1) 打开电源开关。
- 2) 打开冷却液。
- 3) 开始进行倒角。
- 4) 停止倒角。
- 5) 关闭冷却液。
- 6) 关闭电源。

7) 取出晶圆。

6. 研磨

研磨的目的在于除去切割或轮磨所造成的锯痕或表面破坏层，同时使晶圆表面达到可进行抛光处理的平坦度。

- 1) 打开电源开关。
- 2) 升起研磨台。
- 3) 放置晶圆。
- 4) 下降研磨台。
- 5) 打开冷却液。
- 6) 打开研磨颗粒。
- 7) 开始进行研磨。
- 8) 停止研磨。
- 9) 关闭研磨颗粒。
- 10) 关闭冷却液。
- 11) 升起研磨台，取出晶圆。
- 12) 超声清洗晶圆。

将晶圆匣放置到清洗水槽中，进行粗洗。

粗洗完毕后，放入到 DHF 溶液中进行酸洗。

酸洗完毕后，再进行超声清洗。

超声清洗完毕后，进行甩干或用气体吹干。

在 20~25℃粗洗 30s 可以去除表面氧化层和金属玷污。用 DHF 清洗，可去除表面氧化层，并可使其上附着的金属连同氧

化层一起落入清洗液中，可以很容易地去除硅片表面的 Al、Fe、Zn、Ni 等金属，但不能充分地去除 Cu。HF:H₂O₂=1:50。

7.腐蚀

硅晶圆片包括硅抛光片。硅棒加工成切片后，切片经过磨片加工成为研磨片，研磨片经过化学腐蚀后成为化腐片，化腐片经过抛光后成为抛光片。Wafer 通常指圆片。

- 1) 配腐蚀液，实验中使用碱腐蚀方法，腐蚀剂为 KOH;
- 2) 厚度分选，分选厚度在 2~5um;
- 3) 进行腐蚀过程，腐蚀参数如表 1-2 所示。

表 1-2 腐蚀参数表

反应温度	60~120℃
时间	10min
腐蚀层厚度	10~20um

- 4) 腐蚀完毕，取出晶圆。

8.抛光

抛光是利用机械、化学或电化学的作用，使工件表面粗糙度降低，以获得光亮、平整表面的加工方法。

- 1) 打开电源开关。
- 2) 升起抛光台。
- 3) 放置抛光垫。
- 4) 放置星形转盘。
- 5) 放置晶圆。

- 6) 下降抛光台。
- 7) 打开冷却液。
- 8) 打开抛光液。
- 9) 开始进行抛光。
- 10) 停止抛光，关闭抛光液，关闭冷却液。
- 11) 升起抛光台，取出晶圆。

9.清洗

针对硅抛光片的清洗方法，由于用不同的抛光方式(有蜡或无蜡)得到的抛光片，其被各种类型的污染杂质玷污的情况各不相同，清洗的侧重点也就各不相同，因此上述各清洗步骤的采用与否及清洗次数的多少也就各不相同。

- 1) 开启设备电源。
- 2) 开启清洗设备连通水槽，通风。
- 3) 准备冲洗水。
- 4) 设定清洗流程，进行清洗。

硅抛光片的一般清洗方法具体流程如下：

- ①无钠清洗剂加热煮三次。
- ②热去离子水冲洗。
- ③3 号液清洗。
- ④热去离子水冲洗。
- ⑤去离子水冲洗。
- ⑥稀氢氟酸漂洗。

⑦去离子水冲洗。

⑧1 号液清洗。

⑨去离子水冲洗。

⑩甩干。

5) 清洗完毕，关闭冲洗水。

10.包装

将成品用柔性材料分隔、包裹、装箱，准备发往以下的芯片制造车间或出厂发给订货客户。

实验仪器

实验设备主要包括：单晶炉、标签纸、米尺、超声波清洗机。

1.单晶炉

单晶硅生长炉是通过直拉法生产单晶硅的制造设备。主要由主机、加热电源和计算机控制系统三大部分组成,单晶炉结构如图 1-3 所示。



图 1-3 单晶炉结构

单晶炉结构说明如下：

- 1) 提拉头：晶升、晶转系统，磁流体系统等。
- 2) 上炉筒：提供晶棒上升空间。
- 3) 副室：提肩、装籽晶、掺杂等的操作空间。
- 4) 炉盖：主炉室向副室的缩径。
- 5) 主炉室：提供热场和熔硅溶液的空间。
- 6) 下炉室：提供排气口和电极穿孔等。
- 7) 下炉室：提供排气口和电极穿孔等。
- 8) 上炉筒提升系统：液压装置，用于上炉筒提升。
- 9) 梯子：攀登炉顶，检查维修提拉头等。
- 10) 观察窗：观察炉内的实际拉晶状态。
- 11) 测温孔：测量对应的保温筒外的温度。
- 12) 排气口：氩气的出口，连接真空泵。
- 13) 坩埚升降系统：坩埚升降旋转系统等。
- 14) 冷却水管组：提供冷却水的分配。
- 15) 减压气氛保护：通过上炉筒、副室、炉盖、主炉室和下炉室形成减压气氛保持系统。
- 16) 机械运动：通过提拉头和坩埚运动系统提供晶转、晶升、坩埚转、坩埚升系统。
- 17) 自动控制系统：通过相机测径、测温孔测温、自动柜控制组成单晶拉制自动控制系统。
- 18) 控制柜：采用 PLC 和上位工业平板电脑 PC 机，配备大

屏幕触摸式 HMI 人机界面、高像素 CCD 测径 ADC 系统，可实现从抽真空→检漏→炉压控制→熔料→稳定→熔接→引晶→放肩→转肩→等径→收尾→停炉全过程自动控制。

19) 报警灯：出现异常情况时发出声光报警。

20) 主操作屏：主要操作在此进行。

21) 状态指示面板：显示各电磁阀状态。

单晶炉的仪器工作原理如下

首先，把高纯度的多晶硅原料放入高纯石英坩埚，通过石墨加热器产生的高温将其熔化；然后，对熔化的硅液稍做降温，使之产生一定的过冷度，再用一根固定在籽晶轴上的硅单晶体(称作籽晶)插入熔体表面，待籽晶与熔体熔合后，慢慢向上拉籽晶，晶体便会在籽晶下端生长。

接着，控制籽晶生长，长出一段长为 100mm 左右、直径为 3~5mm 的细颈，用于消除高温溶液对籽晶的强烈热冲击而产生的原子排列的位错，这个过程就是引晶；随后，放大晶体直径到工艺要求的大小，一般为 75~300mm，这个过程称为放肩；接着，突然提高拉速进行转肩操作，使肩部近似直角。

然后，进入等径工艺，通过控制热场温度和晶体提升速度，生长出一定直径规格大小的单晶柱体。

最后，待大部分硅溶液都已经完成结晶时，再将晶体逐渐缩小而形成尾形锥体，称为收尾工艺。这样一个单晶拉制过程就基本完成，进行一定的保温冷却后就可以取出。

2.硅原料

每炉原料已经经过计算和配重，将原料、辅料分发至炉前。原料主要是多晶硅材料、单晶边皮和头尾坩埚底料硅片。多晶硅材料如图 1-4 所示。



图 1-4 多晶硅材料

3.籽晶

籽晶是具有和所需晶体相同晶向的小晶体，是生长单晶的种子，也叫晶种。用不同晶向的籽晶作为晶种，会获得不同晶向的单晶。籽晶如图 1-5 所示



图 1-5 籽晶

4.石英坩埚

石英坩埚具有高纯度、耐温性强、尺寸大、精度高、保温性好、节约能源、质量稳定等优点，是拉制大直径单晶硅，发展大规模集成电路必不可少的基础材料。石英坩埚如图 1-6 所示。



图 1-6 石英坩埚

5.晶棒滚磨机床

由于在晶棒成长过程中，其外径尺寸和圆度均有一定偏差，其外圆柱面也凹凸不平，所以必须对外径进行修整、研磨，使其尺寸、形状误差均小于允许偏差。晶棒滚磨机床如图 1-7 所示。



图 1-7 晶棒滚磨机床

6.金刚石单线锯机

将长成的晶棒去掉直径偏小的头、尾部分，并对尺寸进行检测。

7.线切机

由于硅的硬度非常大，所以在本工序里，采用环状的、内径边缘镶嵌有钻石颗粒的薄片锯片，将晶棒切割成一片片薄片。

8.倒角机

由于刚切下来的晶片外边缘很锋利，硅单晶又是脆性材料，为避免边角崩裂影响晶片强度、破坏晶片表面光洁度和对后续工序带来污染颗粒，必须用专用的电脑控制设备自动修整晶片边缘

形状和外径尺寸。

9.研磨机

研磨的目的在于去掉切割时在晶片表面产生的锯痕和破损，使晶片表面达到所要求的光洁度。

10.双面抛光设备

对晶片的边缘和表面进行抛光处理，一来进一步去掉附着在晶片上的微粒，二来获得极佳的表面平整度，以利于后面所要讲到的晶圆处理工序加工。

11.全自动清洗水槽

包括水槽、高压水泵、出水阀、清洗篮、超声波换能器、进水阀、控制面板。

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 1-8 所示。



图 1-8 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。

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,实验操作指导界面如图 1-9 所示。



图 1-9 实验操作指导界面

4.拉单晶实验工艺

1) 配料：按照生产计划进行每炉原料的配重和计算，使产品的质量参数达到预期要求；将原、辅料分发至炉前,配料筒如图 1-10 所示。

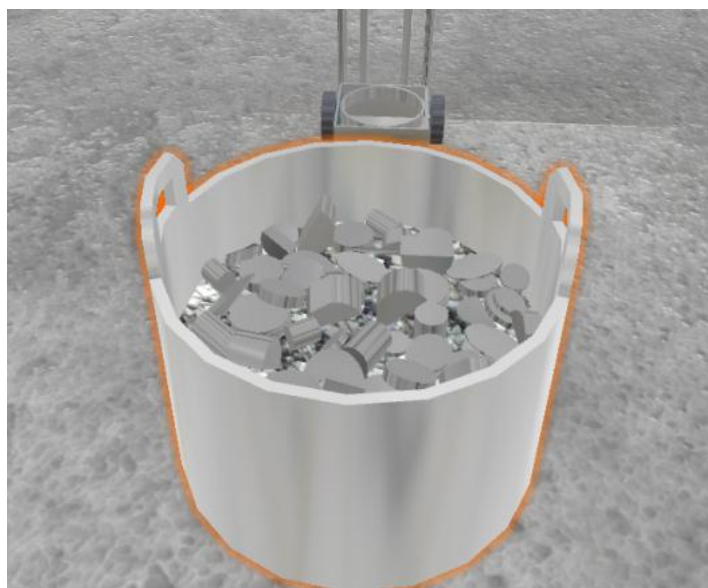


图 1-10 配料筒

操作方法：鼠标点击“配料筒”，弹出“拉晶指示书”，点击“确认”按钮，原料审核通过，拉晶指示书如图 1-11 所示。

提示信息

拉晶指示书			
晶体编号	目标电阻率	目标直径	备注
N001	$3.5 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$	6.5"/10"	
原料名称	型号电阻率	重量 kg	
多晶硅原材料	$\geq 1.0 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$	30	25%
头尾料	$\geq 4.0 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$	60	50%
锅底料硅片	$\geq 1.5 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$	30	25%
审核			

确定

图 1-11 拉晶指示书

2) 装炉：按热系统设计方案装配系统零部件，同时将多晶硅原材料、掺杂剂放入单晶炉承载原料的容器石英坩埚内。

操作方法：鼠标点击“石英坩埚”，进入石英坩埚检查场景，进行 360 度检查后，点击“确认检查无误”。

鼠标点击打开控制柜的“电源”按钮，电源开关指示灯亮，开启设备电源，设备电源如图 1-12 所示。

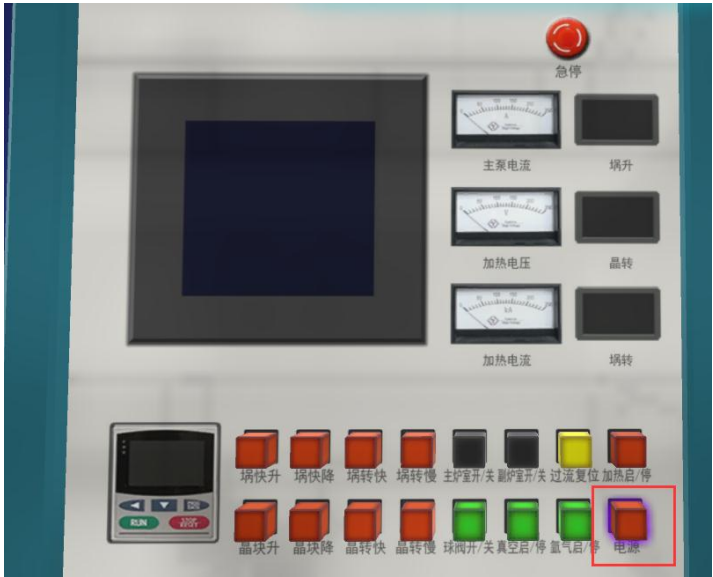


图 1-12 设备电源

点击“主炉室开/关”，主炉室打开。

点击“石英坩埚”，将石英坩埚放入炉室。

点击“配料筒”，弹出“装炉顺序”遮罩，选择正确后，关闭遮罩；选择错误，不允许进行下一步，装炉顺序如图 1-13 所示。

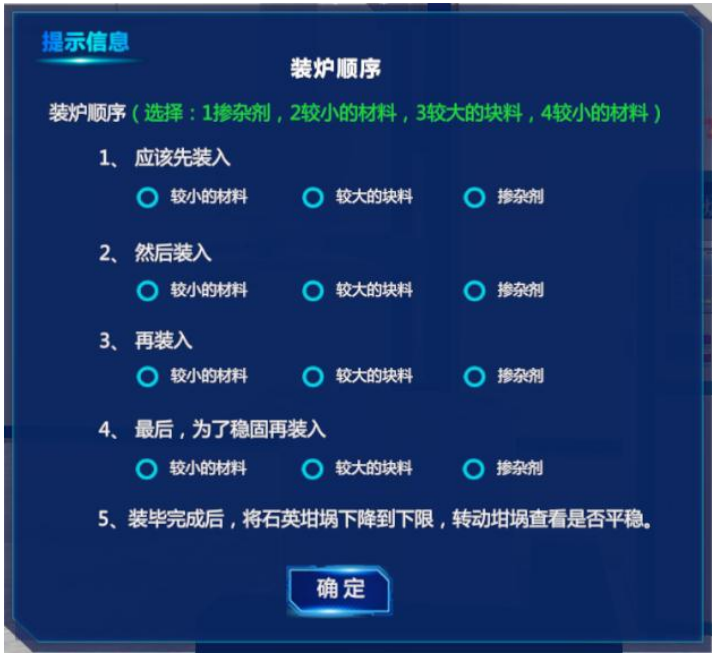


图 1-13 装炉顺序

选择正确后，配料筒中的料自动放入石英坩埚。

再次点击“主炉室开/关”，主炉室关闭。

3) 抽真空：启动真空泵对单晶炉抽真空，在规定时间内达到设备最低真空、压升率要求。

操作方法：鼠标点击“球阀开关”（球阀的作用是控制真空阀门），球阀打开，球阀灯亮。

鼠标再次点击“真空启/停”开关，真空泵打开，开始抽真空。

真空度（1Torr=133 Pa）从 $1.0^5 \times 10^5 \text{Pa}$ （789.47 Torr）降低到 $3.0 \times 100 \sim 3.99 \times 100 \text{Pa}$ 之间（30mTorr 以下），耗时 10 秒，然后真空度稳定，抽真空期间充氩气 3 遍(Ar 气流量显示为 100，开关 3 次氩气即可)，以替换出内部气体：

4) 加热：给单晶炉通入氩气后通电，保持单晶炉设备真空符合拉晶要求，按档调节进行加热化硅。

操作方法：鼠标点击“氩气启/停”开关，“氩气”充入炉室，Ar 气流量显示为 40，主炉室压力显示为 $1.00 \times 10^3 \text{Pa}$ （单晶生长压力要求在 1000Pa 附近）。

5) 化硅：在规定加热功率下熔化硅料，调节温度在硅的熔点 1412°C 以上进行化料，将炉料全部熔化完毕，并使炉内温度趋于稳定。

操作方法：鼠标点击“加热启/停”开关，进行加热；

温度逐渐（15s）上升到 1412°C ，硅不熔化；温度稳定在熔

点 1412°C (15s)，硅开始熔化，直到完全熔化；然后温度逐渐 (15s) 上升到 1470°C ，保持温度稳定。该过程中电压为 220V， $\text{电流}=\text{电压}/\text{功率}$ ，单位 kA。功率自动从 $30\text{kW}\rightarrow 90\text{kW}\rightarrow 70\text{kW}$ 。

按键盘“F3” 键，切换仪器透视效果，融化透视效果如图 1-14 所示。

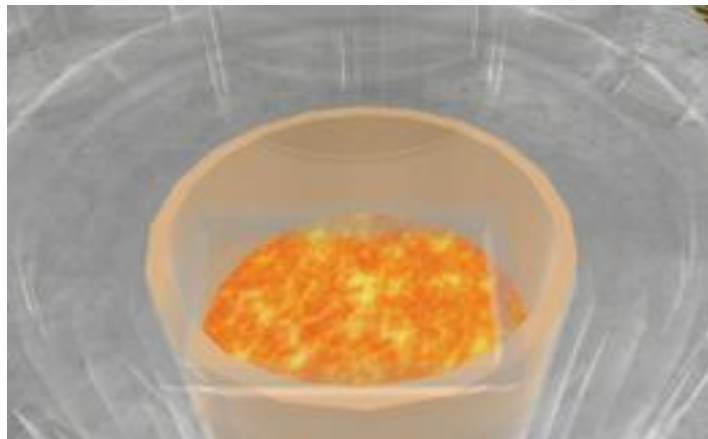


图 1-14 融化透视效果

6) 接种：待炉内温度稳定到适合引晶的温度时，将籽晶慢慢接触熔硅液面上方，使之预热后籽晶将自动吸附在熔硅液面，待光圈稳定后提升拉速，进入下一工艺流程，接种时温度尽可能高一点。

操作方法：温度稳定在 1470°C 后，输入提升速度（提升速度 SL 范围 $0.2\text{ mm/min}\sim 500\text{ mm/min}$ ），要求提升速度小于 100 mm/min 。

鼠标点击“晶快降”按钮，籽晶开始下降，并慢慢接触熔硅液面。当籽晶稍微浸没于熔硅液面时，周围产生一个光圈，光圈变大，最后稳定。鼠标点击“晶快降”按钮，通过打开和关闭来控制下降的位置，接种效果如图 1-15 所示。

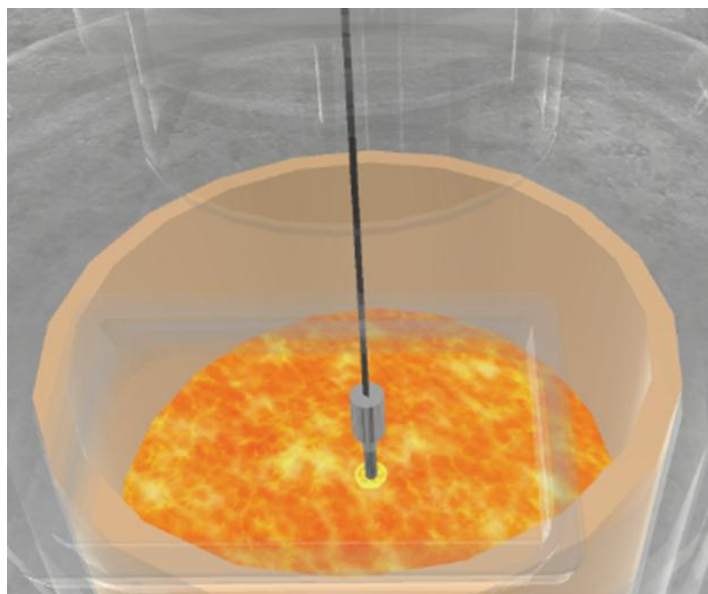


图 1-15 接种效果

7) 引晶：根据炉内的温度，按一定的速度变化范围提升籽晶，按规定长度要求生长规定直径的细径单晶。

操作方法：输入提升速度（提升速度 SL 范围 0.2 mm/min~500 mm/min），要求提升速度小于 100 mm/min；鼠标点击“晶快升”按钮，通过打开和关闭来控制提升位置。

引晶结束后，点击“人工操作”按钮，切换到“自动操作”状态，自动完成放肩、转肩、等径、收尾过程。

8) 放肩：缩颈长度、细直径单晶符合要求后，降低拉速和控制温度使单晶直径向径向防线逐渐生长，并达到所需的直径尺寸要求。在放肩快结束时，校正 CCD 上的晶体直径读数与实际值一致，放肩效果如图 1-16 所示。

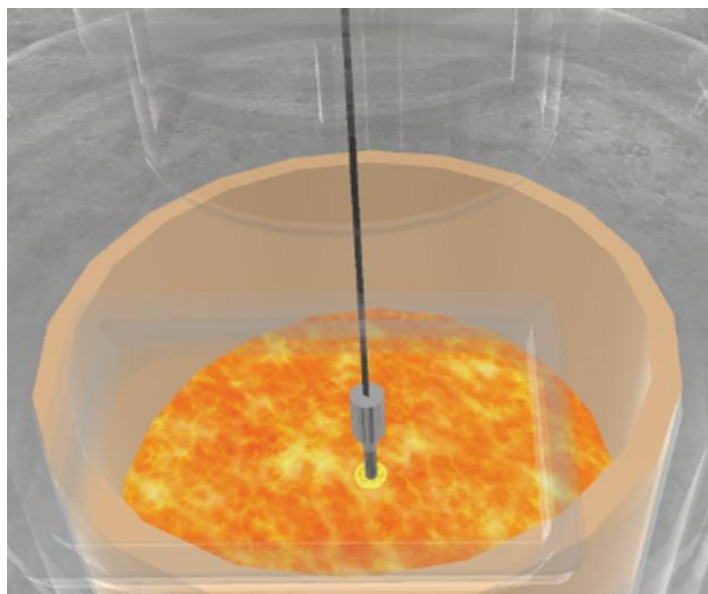


图 1-16 放肩

9) 转肩：晶体直径在规定范围内生长，控制直径，使晶体由横向生长变成纵向生长。提高拉速使晶体直径在规定范围内等径生长，转肩效果如图 1-17 所示。

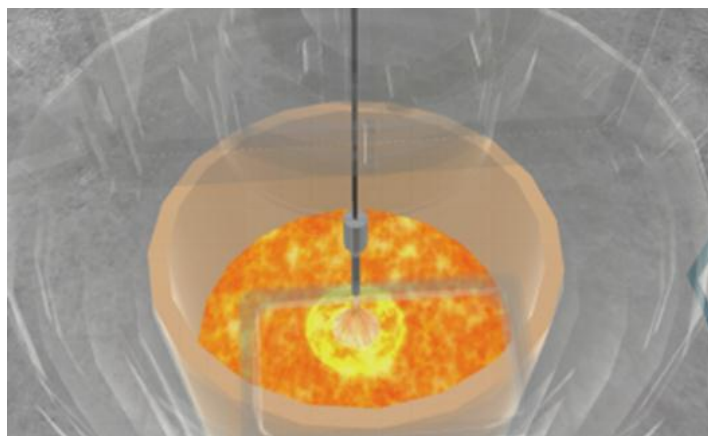


图 1-17 转肩

10) 等径：放肩符合要求后，晶体生长步长清零并给定合适的过跟比，待直径趋于稳定后，投入计算机控制其自动生长，晶体将在自动条件下生长到规定长度，等径如图 1-18 所示。

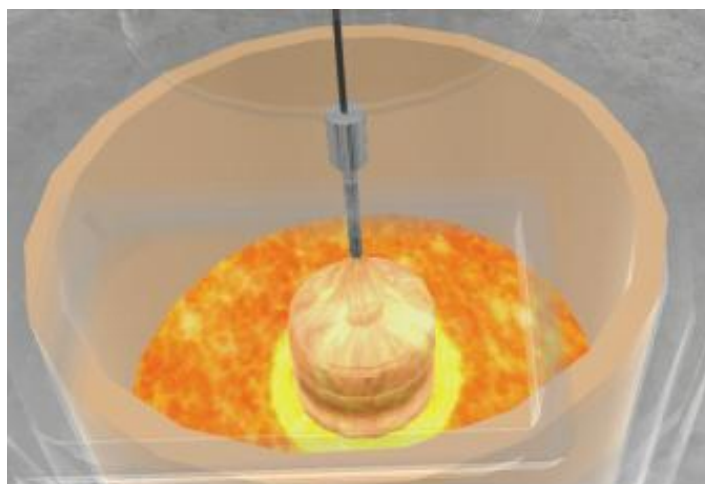


图 1-18 等径

11) 收尾：在长晶的最后阶段，为防止热冲击造成单晶等径部分出现滑移线而进行的逐步缩小直径的过程。当坩埚内炉料剩余到一定程度之后，通过收尾控制使单晶直径缓慢变细，直至排除为错后与液面脱离，收尾效果如图 1-19 所示。

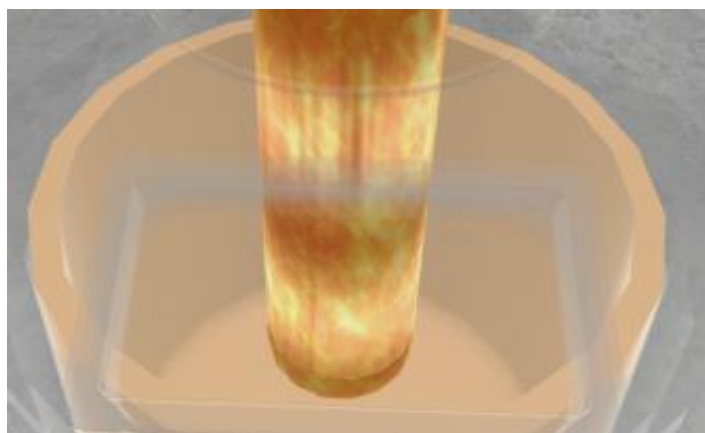


图 1-19 收尾

12) 停炉：根据工艺要求逐次降温，同时使计算机的参数清零，停止坩埚旋转，使用氩气冷却保护，待炉内发暗后停止通入氩气，抽真空并记录，关闭球阀，记录压升率，给下炉开炉提供数据。

操作方法：鼠标点击“加热启/停”开关，关闭加热。

温度逐渐（15s）从 1420℃下降到 500℃以下（炉内发暗），停止通入氩气，真空度逐渐达到 $3.0 \times 10^0 \sim 3.99 \times 10^0 \text{Pa}$ 之间；

当温度低于 40℃以下，点击“真空启/停”按钮，真空泵关闭，气压逐渐回升到 $1.05 \times 10^5 \text{Pa}$ ，温度最终会降低室温 26℃；

13) 清炉：取出晶体，清理单晶炉设备及热系统工件的表面杂质、附着物及缝隙处的杂质、附着物，经清理后设备应符合投料开炉的要求。

操作方法：鼠标点击“主炉室开/关”，主炉室开关打开。

鼠标点击“小车”，小车自动移动到炉盖下方，晶棒自动下降到小车上。

鼠标点击“晶棒”上端，“晶棒”切断。

14) 晶棒：将取出的晶棒及坩埚底料等送入原料间，进入后道生产工序。

“晶棒”切断后，“小车”自动载着“晶棒”移动到“加工车间”，进入后道生产工序，进入后道工艺生产如图 1-20 所示。



图 1-20 进入后道工艺生产

5.切断工艺

1) 打开单线锯机箱盖。

操作方法：鼠标点击“箱盖”，箱盖自动打开；

2) 放置晶棒。

操作方法：鼠标点击小车上的“晶棒”，晶棒自动放置到线锯载物台上。

3) 关闭单线锯机箱盖。

操作方法：鼠标再次点击“箱盖”，箱盖自动关闭。

4) 打开金刚石单线锯机电源。

操作方法：鼠标点击“线锯机控制柜”上的“电源按钮”，打开电源。

5) 开启冷却液。

操作方法：鼠标点击“启动冷却液”，打开冷却液。

6) 始进行切割。

操作方法：鼠标点击线锯机控制柜上的“Run”按钮，开始进行切割。

7) 关闭金刚石单线锯机。

操作方法：切割完毕后，鼠标点击线锯机控制柜上的“Stop”按钮，线锯机停止转动。

8) 关闭冷却液。

操作方法：鼠标点击“关闭冷却液”，关闭冷却液。

9) 切割完毕后，再次打开单线锯机箱盖。

操作方法：鼠标点击“箱盖”，“箱盖”自动打开。

10) 取下晶棒。

操作方法：鼠标点击载物台上的“晶棒”，晶棒移动到滚磨机床载物台上。

6. 外径滚磨、开槽工艺

1) 根据单晶的长度，调整尾座位置，固定限位。

2) 找正：测量加工工件长短，确定尾座的位置，查看夹具是否合适、工件两端是否平整。将工件架架好，检查夹具的松紧程度是否合适。

操作方法：“晶棒”放置完毕后，闪烁显示；鼠标点击“晶棒”，弹出对话框“单晶棒以固定到合适位置”，同时摄像头显示左右两端固定好的特效。

3) 确认夹紧后将机器的防护罩装好，将所有工具放回原位，检查移动部位有无障碍物，关闭防护罩。

操作方法：鼠标分别点击左右两边的“防护罩”，关闭防护罩，如图 1-21 所示。



图 1-21 关闭防护罩

4) 查看指示灯是否正常，然后按操作规程启动设备，当设备正常运行 1 分钟后，开启冷却液，调整冷却液水流的大小和砂轮之间的距离，以间距 6 公分为宜。

操作方法：鼠标点击“电源”开关，电源指示灯亮，如图 1-22 所示。



图 1-22 打开设备电源

鼠标点击“开启冷却液”开关，冷却液开启，如图 1-23 所示。



图 1-23 冷却液开启

5) 一切正常后方可动机器，开始滚磨。

操作方法：鼠标点击“开始滚磨”开关，开始进行滚磨，滚磨完成后，自动进行平边。

6) 滚磨工作结束后，停水、停电。

操作方法：鼠标点击“关闭冷却液”开关，冷却液关闭；鼠标点击“电源”开关，电源关闭，指示灯灭。

7) 取出“晶棒”。

操作方法：鼠标分别点击左右两边的“防护罩”，打开防护罩。

鼠标点击载物台上的“晶棒”，晶棒移动到晶棒运输小车上，晶棒运输小车自动移动到多线切割机前。

7.切片工艺

采用内径锯进行切片，其锯片是一环状薄叶片，内径边缘镶有钻石颗粒。切片前预先在晶棒上粘贴一块石墨板，不仅有利于

切片的夹持，更可以避免在最后切断阶段锯片离开晶棒时所造成的破裂。晶圆切片的厚度、弓形度（bow）及挠屈度（warp）等特性为制程管制要点。影响晶圆质量的因素除了切割机台本身的稳定度与设计外，锯片的张力状况及钻石锐利度的保持都有很大的影响。

1) 领取晶棒：需要核对随工单、晶体编号、长度、有无崩边、未倒角裂纹、是否和随工单一样。

操作方法：鼠标点击“晶棒运输小车”，打开随工单对话框进行检查确认,晶圆随工单如图 1-24 所示。



图 1-24 晶圆随工单

2) 先把晶棒表面的胶刮干净，再用酒精把表面擦干净，注意晶拖两侧的胶要刮干净，燕尾槽内涂抹润滑油脂。

3) 把晶棒装到夹具上，然后把晶棒下表面再次擦拭干净，用装卸棒起升车装到线切割机上。

操作方法：鼠标点击“晶棒”，晶棒自动装到夹具上，标注文字消失。

4) 打开主电源开关。

操作方法：鼠标点击“主电源开关”按钮，打开主电源。

5) 打开操作系统。

操作方法：鼠标点击“操作系统”按钮，打开操作系统。

6) 打开砂浆，看砂浆是否连续。

操作方法：鼠标点击“打开砂浆”按钮，砂浆启动。

7) 关门，开始双向热机 10~30 分钟，对应程序等待 10 秒。

操作方法：鼠标点击“防护门”，防护门关闭。

鼠标点击“开始热机”按钮，开始热机按钮对应指示灯亮，显示热机进度条，热机结束后指示灯灭。

8) 停止热机，检查是否有跳线，如有跳线则处理跳线后再次热机，直到没有跳线为止。

操作方法：鼠标点击“停止热机”，检查是否有跳线。

9) 进行切片。

操作方法：鼠标点击“切片”按钮，开始进行切片。

10) 停机，先关闭操作系统，再关闭主电源开关。

操作方法：切片完成后，鼠标点击“关闭砂浆”按钮，关闭砂浆。

鼠标再次点击“操作系统”按钮，关闭操作系统。

鼠标再次点击“主电源开关”按钮，关闭主电源。

11) 取出晶圆片。

操作方法：鼠标再次点击“防护门”，防护门打开。

鼠标点击“晶圆”，晶圆自动放入晶圆匣中。

鼠标点击“晶圆匣”，晶圆匣自动放置到倒角机测定部位置。

8.倒角工艺

刚切好的晶圆，其边缘垂直于切割平面呈锐利的直角。由于单晶硅硬脆的材料特性，此角极易崩裂，不但影响晶圆强度，更成为制程中污染微粒的来源，且在后续的半导体制程中，未经处理的晶圆边缘也会影响光组与磊晶层之间的厚度，故须以专用的电脑控制设备自动修整切片晶圆的边缘形状与外径尺寸。

倒角机操作面板分为控制按钮和显示器两大部分，可以实现参数设定、各个动作控制、自动研磨的控制等。

1) 打开电源开关。

操作方法：鼠标点击倒角机“电源”开关，倒角机电源打开。

2) 打开冷却液。

操作方法：鼠标点击“冷却液”开关，冷却液打开。

3) 开始进行倒角。

操作方法：鼠标点击“RUN”开关，机械手把晶片从测定部移动到研削盘上，开始进行倒角。

倒角完成后，机械手把晶片从研削盘上移动到洗净盘上，在高速旋转的晶片里放入洗净水，再用气体吹干，实现洗净功能。洁净的晶圆放置到另一侧的晶圆匣中。

4) 停止倒角。

操作方法：鼠标点击“STOP”开关，停止倒角。

5) 关闭冷却液。

操作方法：鼠标点击“冷却液”开关，冷却液关闭。

6) 关闭电源。

操作方法：鼠标再次点击“电源”开关，电源关闭。

7) 取出晶圆。

操作方法：鼠标点击装满洁净“晶圆”的晶圆匣，晶圆匣自动放置到小车上，移动到研磨床机旁边。

9.研磨

研磨的目的在于除去切割或轮磨所造成的锯痕或表面破坏层，同时使晶圆表面达到可进行抛光处理的平坦度。涂敷或压嵌在研磨具上的磨料颗粒，通过研磨具与工件在一定压力下的相对运动对加工表面进行精整加工。

1) 打开电源开关。

操作方法：鼠标点击磨床“电源”开关，磨床电源打开。

2) 升起研磨台。

操作方法：鼠标点击磨床“升起研具”开关，研磨具升起。

3) 放置晶圆。

操作方法：鼠标点击“晶圆匣”，晶圆片自动放置到研磨台上。

4) 下降研磨台。

操作方法：鼠标点击磨床“下降研具”开关，研磨具降落闭合。

5) 打开冷却液。

操作方法：鼠标点击“冷却液”开关，冷却液打开。

6) 打开研磨颗粒。

操作方法：鼠标点击“研磨颗粒”开关，研磨颗粒打开。

7) 开始进行研磨。

操作方法：鼠标点击“RUN”开关，开始进行研磨。

8) 停止研磨。

操作方法：研磨完毕后，鼠标点击“STOP”开关，停止研磨。

9) 关闭研磨颗粒。

操作方法：鼠标再次点击“研磨颗粒”开关，研磨颗粒关闭。

10) 关闭冷却液。

操作方法：鼠标再次点击“冷却液”开关，冷却液关闭。

11) 升起研磨台。

操作方法：鼠标点击磨床“升起研具”开关，研具升起。

12) 取出晶圆。

操作方法：鼠标点击“晶圆片”，晶圆片自动放置到晶圆匣中。

13) 关闭电源。

操作方法：鼠标再次点击“电源”开关，电源关闭。

14) 超声清洗晶圆。

操作方法：鼠标点击“晶圆匣”，“晶圆匣”自动移动到清洗水槽中，进行粗洗。播放晶片洗净过程动画；粗洗完毕后，放入到DHF溶液中进行酸洗；酸洗完毕后，自动移动到超声水洗槽中，进行超声清洗；超声清洗完毕，进行甩干，再用气体吹干；晶圆清洗完毕后，“晶圆匣”自动放到腐蚀区的小车上。

10.腐蚀

硅棒加工成片后成为切片，切片经过磨片加工成为研磨片，研磨片经过化学腐蚀后成为化腐片，化腐片经过抛光后成为抛光片。Wafer 通常指圆片。

1)配腐蚀液,实验中使用碱腐蚀方法,腐蚀剂为 KOH 溶液。

操作方法：鼠标点击腐蚀水槽“操作面板”，弹出“操作面板”界面。

KOH 的浓度：30%~50%，正确输入浓度后，点击确认，参数设置界面如图 1-25 所示。



图 1-25 参数设置界面

2) 厚度分选

操作方法：鼠标点击“晶圆匣”，弹出“厚度分选”界面：晶圆厚度分选时，分选厚度在 2~5um，学生输入正确后，点击确认；“晶圆匣”放置到待腐蚀位置，厚度参数设置界面如图 1-26 所示。

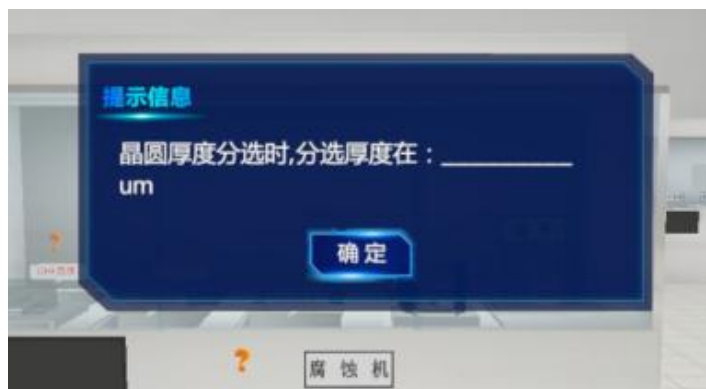


图 1-26 厚度参数设置界面

3) 腐蚀过程

操作方法：鼠标点击腐蚀水槽“操作面板”，弹出“操作面板”界面。

反应温度：60~120℃。时间：10min。腐蚀层：10~20um。

正确输入参数后，点击确认，开始播放进行腐蚀过程动画，腐蚀参数设置界面如图 1-27 所示。



图 1-27 腐蚀参数设置界面

4) 腐蚀结束

操作方法：腐蚀完成后，鼠标点击腐蚀完成后的“晶圆匣”，晶圆匣移动到抛光机床旁边的小车上。

11. 抛光工艺

抛光是利用机械、化学或电化学的作用，使工件表面粗糙度降低，以获得光亮、平整表面的加工方法。

1) 打开电源。

操作方法：鼠标点击抛光机床“电源”开关，抛光机床电源打开。

2) 升起抛光台。

操作方法：鼠标点击抛光机床“升起”开关，陶瓷板升起。

3) 放置抛光垫。

操作方法：鼠标点击“抛光垫”，抛光垫自动放置到抛光台上。

4) 放置星形转盘。

操作方法：鼠标点击“星形转盘”，星形转盘自动放置到抛光台上。

5) 放置晶圆。

操作方法：鼠标点击“晶圆匣”，晶圆片自动放置到抛光台上。

6) 下降抛光台。

操作方法：鼠标点击抛光机床“下降”开关，陶瓷板降落闭合。

7) 打开冷却液。

操作方法：鼠标点击“冷却液”开关，冷却液打开。

8) 打开抛光液。

操作方法：鼠标点击“抛光液”开关，抛光液打开。

9) 开始进行抛光。

操作方法：鼠标点击“控制面板”，设置粗抛参数；鼠标点

击“RUN”开关，开始进行粗抛。粗抛完毕后，转盘停止运动。

鼠标点击“控制面板”，设置精抛参数；鼠标点击“RUN”开关，开始进行精抛；

10) 停止抛光。

操作方法：抛光完毕后，鼠标点击“STOP”开关，停止抛光。

11) 关闭抛光液。

操作方法：鼠标再次点击“抛光液”开关，抛光液关闭。

12) 关闭冷却液。

操作方法：鼠标再次点击“冷却液”开关，冷却液关闭。

13) 升起抛光台。

操作方法：鼠标点击抛光机床“升起”开关，陶瓷板升起。

14) 取出晶圆。

操作方法：鼠标点击“晶圆片”，晶圆片自动放置到晶圆匣中。

15) 关闭电源。

操作方法：鼠标再次点击“电源”开关，电源关闭。

16) 取下晶圆片，进行洗净。

操作方法：鼠标点击“晶圆匣”，晶圆匣自动移动到抛光清洗水槽待清洗位置。

12.清洗

针对硅抛光片的清洗方法，由于用不同的抛光方式(有蜡或无蜡)得到的抛光片，其被各种类型的污染杂质玷污的情况各不相同，清洗的侧重点也就各不相同，因此上述各清洗步骤的采用

与否及清洗次数的多少也就各不相同，清洗设备如图 1-28 所示。



图 1-28 清洗设备

1) 开启设备电源。

操作方法：鼠标点击“电源”按钮，开启清洗设备电源。

2) 开启清洗设备，连通水槽，通风。

操作方法：鼠标点击“通风开启/关闭”按钮，开启通风。

3) 准备冲洗水。

操作方法：鼠标点击“冲洗水开启/关闭”按钮，开启冲洗水。

4) 设定清洗流程，进行清洗。

操作方法：鼠标点击“操作面板”，弹出清洗流程控制面板；鼠标点击“RUN”按钮，开始进行自动清洗。

5) 关闭冲洗水。

操作方法：鼠标再次点击“冲洗水开启/关闭”按钮，关闭冲洗水。

6) 清洗结束。

操作方法：鼠标点击清洗完毕的晶圆提篮，晶圆提篮，自动放置到包装设备台上，进行自动包装。

13.包装

将成品用柔性材料分隔、包裹、装箱，准备发往以下的芯片

制造车间或出厂发给订货客户。

操作方法：鼠标点击包装机设备电源开关，自动进行硅片包装。将成品用柔性材料、分隔、包裹、装箱。

思考题

- 1.如果籽晶是{100}晶向，拉出的晶体是什么晶向？
- 2.分析研磨与抛光的区别。
- 3.为什么晶圆的边缘是圆的？
- 4.简述拉单晶工艺流程步骤。

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；