

半导体专用设备简介

1 概述

作为军用电子元器件的技术支撑，专用设备(以下也称为工艺设备或制造设备)是重要基础之一。在成百上千种电子元器件专用设备中，半导体专用设备集光、机、电、计算机技术于一体，汇各工业领域尖端技术之大成，是最具先进性和代表性的设备。限于篇幅，本章仅以半导体设备作为基本内容加以介绍。

在半导体制造中，通常把专用设备分为前道工艺设备(晶圆制造)、后道工艺设备(组装与封装)、制版设备和材料制备设备，其中都包括检测设备和仪器。如图 2.1 和 2.2 所示，按照半导体工艺步骤又可将工艺设备分为晶体生长与晶圆制备、掩膜图形设计与制造、外延、高温氧化、薄膜制备、光刻、刻蚀、掺杂、平坦化、中间测试、组装与封装、成品测试等十二类，涉及各种用途的具体设备近百种，图中只列出了具有代表性的设备名称。为叙述方便，不妨对十几种关键设备做具体介绍，力求取得触类旁通的效果。

几十年来，随着半导体技术的快速发展，半导体设备也在一代接一代地创新和发展。当今半导体设备的制造和使用涉及 50 余个学科和近 60 种化学元素等诸多方面的高新技术，具有极强的技术综合性。不仅如此，半导体设备技术的发展逐步将工艺技术模块化集成到设备中，使其高度自动化和高度智能化，逐步改变了设备与工艺自然分离的局面，时时走在半导体制造业发展的前列，发挥着特殊的重要作用。

半导体设备的进一步发展，使其应用领域变得越来越广，在其他电子器件制造领域也都不同程度地采用了半导体设备或由半导体设备演化的设备，成为半导体设备应用的新领域。尤其是在微/纳电子器件、微/纳光机电系统等极小尺寸和极高精度的产品制造领域的逐步应用，对军用电子元器件发展具有极其重要的意义。

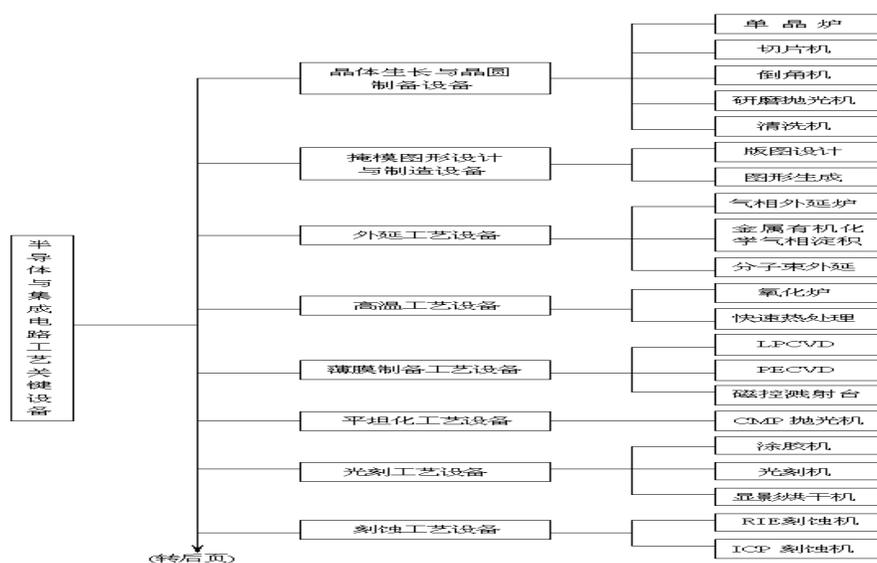


图 2.1—半导体与集成电路工艺关键设备框图

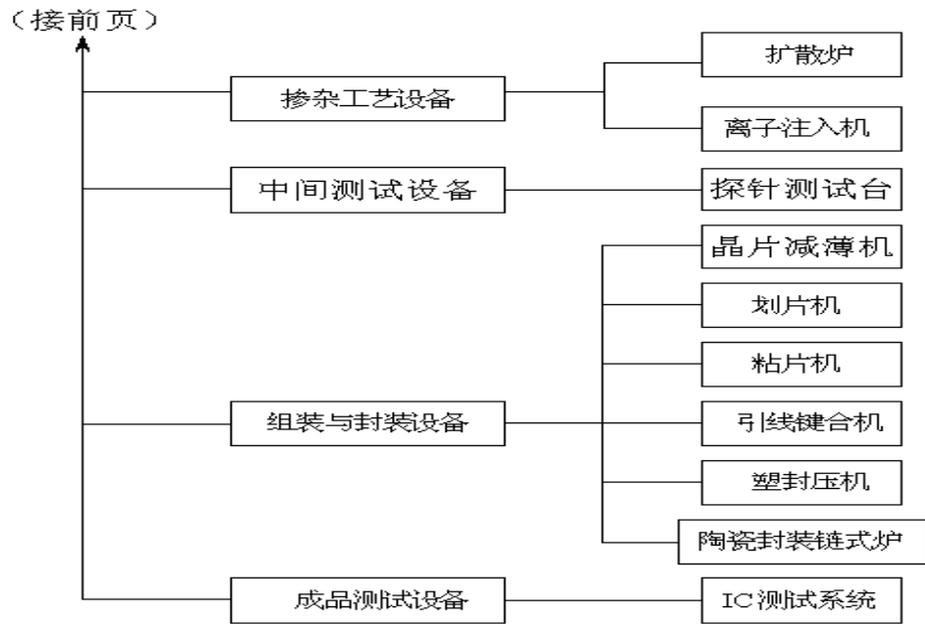


图 2.2—半导体与集成电路工艺关键设备框图（续）

2 单晶炉

2.1 基本概念及工作原理

晶体生长最广泛使用的设备是采用 CZ (Czochralski) 法的直拉单晶炉。它主要由主/副炉室、石英坩埚及驱动、籽晶旋转及提升、真空及充气系统、射频或电阻加热器和控制系统等部分组成，如图 2.3 所示。

生长单晶硅，首先将提纯的多晶硅块和少量掺杂材料 (B_2 或 P_2) 装入炉室内的石英坩埚中，待抽真空或充入惰性气体后用加热器加热使多晶硅块和掺杂材料熔化，控制炉温在硅熔点温度 ($1420^{\circ}C$) 使保持液态熔体，即可将籽晶安置到刚接触到液面的位置。随着籽晶从熔体表面旋转并缓慢提升，一层硅原子定向结晶成籽晶同样的晶体结构，掺杂材料的原子也进入生长的晶体中。通过引晶、缩颈、放肩、等径生长、收尾等一系列操作，在外加磁场的作用下抑制熔体内的热对流，从而拉制出高质量的 N 型或 P 型单晶锭。

直拉单晶炉在应用中演化出液封直拉单晶炉、场直拉单晶炉等多种单晶拉制设备。液

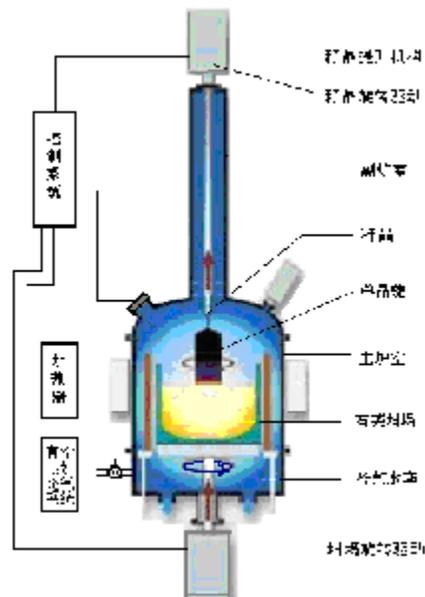


图 2.3—直拉单晶炉结构示意图

封直拉单晶炉可用来生长砷化镓晶体。另一种制备单晶常用的设备是区熔单晶炉。

2.2 主要技术性能

单晶晶锭尺寸： $\Phi 3'' \sim \Phi 12''$

最高加热温度：1600℃

炉温控制精度：优于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$

籽晶拉速范围：0.1~10mm/min

坩埚升速范围：0.02~2.5mm/min

坩埚转速范围：1~30r/min

2.3 产品应用范围

直拉单晶炉适用于拉制硅单晶锭。利用不同的热场可以拉制不同直径的单晶锭，其中最大直径可达450mm。

2.4 技术发展趋势

目前200mm直径的国产单晶炉已基本满足国内市场需要,300mm直径产品于2007年完成研发并拉制出单晶锭。国外300mm直径的晶圆1994年已经投入量产。据国际半导体技术指南ITRS2006预测,直径450mm硅单晶抛光片是300mm的下一代产品,也是未来22nm线宽集成电路的衬底材料。研发并完善450mm直径的晶体生长设备是行业发展的必然趋势。

3 内圆切片机

3.1 基本概念及工作原理

晶锭切片是通过高速旋转的镀有金刚砂的刀具与晶锭径向磨削来实现的。切割设备主要有内圆切片机、外圆切片机、多刀切割机和线锯。内圆切片机按其结构有卧式和立式之分。立式内圆切片机(见图2.4)主要由立式旋转主轴、张刀机构、送料机构、切割进给驱动及自动控制系统组成。刀具(特制的内圆刀片)被张紧在主轴顶端刀环上,晶锭首先粘结在一个切割块上用以保证晶体的正确晶向,然后将切割块装卡在送料机构上。主轴以每分钟近两千转的速度旋转,送料机构按预定的片厚将晶锭送入刀片内圆刃口中,然后横向缓慢进行切割进给。高速旋转的内圆刃口与缓慢进给的晶锭磨削,将晶锭切割成片。

3.2 主要技术性能

内圆切片机的主要技术参数如下：

切割材料直径： 300mm 及以下

片厚设定范围： 0.001~40mm

切割进给速度 1-99mm/mi n

送料重复精度 $\leq \pm 0.007\text{mm}$

3.3 产品应用范围

内圆切片机主要用于硅单晶、砷化镓等半导体材料及光学玻璃、陶瓷、石英、铁氧体、铌酸锂、钽酸锂等脆硬电子材料的自动切割成片。

3.4 技术发展趋势

对于 $\Phi 200\text{mm}$ 及其以上硅片切割，目前尚无相应的国产设备。日产 T-SM-300 内圆切片机，其刀片外径达 1180mm。由于刀片直径过大的障碍，内圆切片机已不宜继续发展，目前大都采用线锯来切片。先进的多线切割机可切割直径达 450mm 的硅、砷化镓、碳化硅、碲化铋等半导体材料，切口质量比线锯更好，成为晶片切割设备发展的目标。切割设备总的朝着大直径、高效率、高质量、低成本的方向发展。

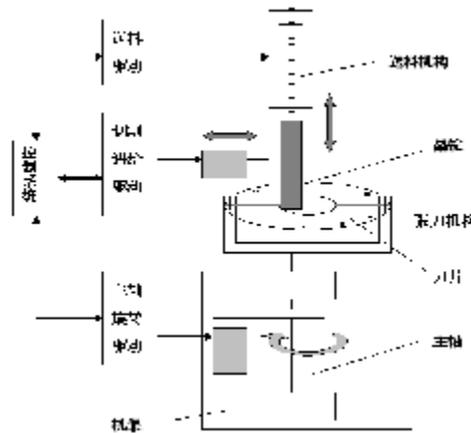


图 2.4—内圆切片机结构示意图

4 硅片倒角机

4.1 基本概念及工作原理

切割研磨后的硅片要进行倒角。倒角是对硅片锐利的边缘进行磨削修整，从而使硅片获得平滑的外缘。因为经过切割的硅片边缘一般会存在裂痕和细小裂缝，会在硅片上产生机械应力，并在硅片制造的热处理中引起边缘位错生长。外缘倒角可以最大限度地克服这些影响，传统工艺中用硅片倒角机加工。

硅片倒角机由硅片传送机构、X-Y 承片台、硅片激光定位系统、磨轮主轴及进给系统、自动清洗甩干机构等部分组成。硅片倒角是在快速旋转同时施加压力的条件下用磨料浆磨削来完成的。

4.2 主要技术性能

硅片倒角机主要技术参数：

可加工晶片尺寸： 150~300mm

磨轮旋转速度： 4500~5000 r/min

片厚测定重复精度： 优于 $\pm 2\mu\text{m}$

4.3 产品应用范围

硅片倒角机主要用于直径 6 ~12 英寸的硅片、玻璃圆片等硬脆电子材料的边缘磨削倒角及修整。

4.4 技术发展趋势

倒角机的发展主要是增大可加工晶圆尺寸和提高生产效率。当前 $\Phi 300$ mm 晶圆生产线已进入量产阶段，倒角机同步提高到适用于 $\Phi 300$ mm 晶圆且发挥更高效率。

5 气相外延炉 (VPEF, Vapor Phase Epitaxial Furnace)

5.1 基本概念及工作原理

外延是在单晶衬底上生长一层新单晶的工艺技术。外延工艺设备有气相外延、液相外延、分子束外延和离子团束外延系统等。

气相外延系统—气相外延炉是利用硅的气态化合物在加热的硅片表面与氢发生反应或自身发生热分解还原生成硅，并以单晶的形态淀积在硅片表面；或者在高掺杂硅衬底上生长外延层以提高器件设计的灵活性和器件的性能，还可以防止 CMOS 器件中的门锁效应。它是制作硅或砷化镓外延膜的基本设备。

如图 2.5 所示，气相外延炉通常由反应室、加热器、支撑并加热晶片的基板、气路系统、真空和真空监测、尾气处理及控制系统等七个功能单元组成。反应室采用石英反应管，通过加热器加热，温控单元控制温度。基板用来放置待加工晶片并加

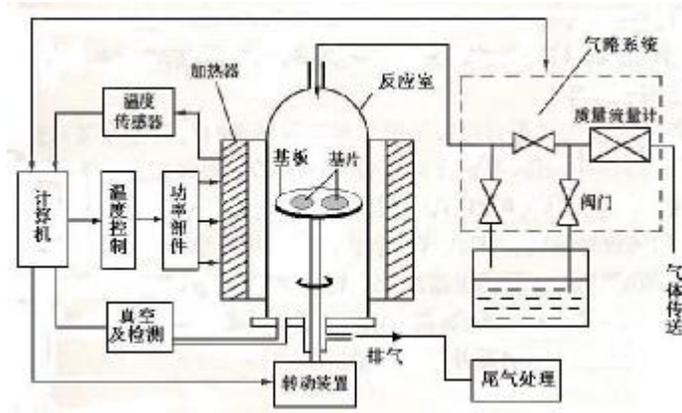


图 2.5—气相外延炉结构原理示意图

热。气路系统装有质量流量控制器控制气体流量。真空系统由抽速较快的无油涡轮分子泵和作为初级泵的机械泵组成。反应室真空由高真空闸板阀来调节。计算机通过温控单元、闸板阀、气体质量流量控制器等自动控制工艺时间、工作温度、反应室压力、气体流量等并监测全部工艺过程。

按反应室的结构不同，气相外延炉可分为卧式、立式和桶式反应炉等。卧式反应炉中的基板需倾斜一定的角度来改善外延层的均匀性。

5.2 主要技术性能

与其它外延设备相比，气相外延炉具有如下独特的优点：

外延生长温度高，生长时间长，因而可以制备较厚的外延层，特别适用于生长 Si 或 GaAs 外延膜。在外延过程中，可以任意改变杂质的浓度梯度和导电类型。结构简单，工艺灵活性较高，可用于多种外延膜生长，更适合量产。

气相外延炉的主要技术参数如下：

工作温度范围： 450~1200℃ 系统极限真空度： 0.7Pa

膜层厚度范围： 1000~6000Å 工作压力范围： 67Pa~133Pa

5.3 产品应用范围

气相外延炉主要用于硅片或砷化镓等半导体晶片气相生长外延薄膜。

5.4 技术发展趋势

外延工艺属于化学气相淀积的范畴，所以先进的 CVD 系统有逐步取代外延炉类设备的趋势。由于外延硅片的成本较高，以大剂量离子注入形成埋层来替代外延层越来越受到关注。

6 分子束外延系统 (MBE, Molecular Beam Epitaxy System)

6.1 基本概念及工作原理

分子束外延系统基于真空蒸发机理，在超高真空环境中，用一束或多束不同强度和化学特性的热能原子束或分子束喷射到具有适当温度的单晶片上，经过化学反应而沿着基片晶向外延生长出新的晶体薄膜，也可称为分子束蒸发。它已被作为一项超微细加工技术而广泛应用。

MBE 系统集成超高真空、薄膜淀积、精密自动控制、在线检测分析、清洗以及原位化学特性兼容于一体，成为当代半导体制造工艺中不可或缺的设备之一。主要由反应室、超高真空控制、蒸发源(喷射炉)、衬底支架附加热器、计算机控制系统以及配置有 CCD 摄像器和四极质谱仪的在线检测系统等组成(见图 2.6)。以砷化镓外延生长为例大致过程是：待加工晶片快速被送进反应室，固定于衬底支架并加热。

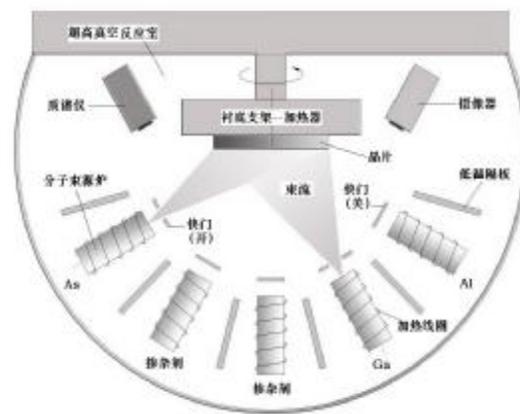


图 2.6—分子束外延工作原理示意图

为使反应温度均匀，衬底支架可以连续旋转。根据外延膜组分和厚度的要求，交替控制镓、砷、铝等基础材料及各种掺杂剂的蒸发速度、供给时间，在外延室的超高真空环境和工艺温度下进行膜层外延生长。外延层生长过程中或完成后，CCD 摄像器观察衍射光点图像和强度变化，实时采集膜厚数据；四极质谱仪进行系统检漏和残气分析。在线检测的结果及时反馈到计算机控制系统。计算机控制系统根据在线检测的参数自动调节反应气氛和材料束流质量、加热温度、旋转速度等，从而精确控制外延薄膜的厚度、组分和掺杂浓度，实现原子尺度的外延生长。

6.2 主要技术性能

MBE 系统在超高真空 ($\sim 10^{-9}$ 托) 下进行外延材料的分子蒸发，可使外延层混入的杂质少纯度高。既能精确控制化学成分的配比，也能精确控制掺杂分布 ($\pm 1\%$ 以内)，可获得原子层量级的多元化合物外延薄膜。还可以放慢蒸发速度 (数埃~数微米 / 小时)，因而可以降低外延温度。由于决定外延层厚度均匀性的参数仅仅是衬底和蒸发源，从而可以很容易地将厚度变化控制在 $\pm 5\%$ 以内。

MBE 系统的主要技术参数如下：

工作温度范围： 400~900℃	生长速率： 0.001~0.3 $\mu\text{m}/\text{min}$
极限真空度： $\leq 10^{-9}$ Torr	厚度不均匀性： 优于 $\pm 0.5\%$

6.3 产品应用范围

MBE 系统主要应用于化合物半导体 (GaAs、GaN 等) 材料的外延生长，是当今生产微波毫米波器件和半导体光电器件外延片的重要设备。

6.4 技术发展趋势

用金属有机化合物代替 III 族元素的分子束外延方法称为 MOMB E, 也称为化学束外延 (CBE), 是 MBE 技术的进一步发展。另外，原子层淀积技术由于其淀积参数的高度可控性、优异的淀积均匀性和一致性，使得其在 IC 制造和纳米材料等领域具有广泛的应用潜力。对于超薄膜淀积，原子层淀积的优点是传统的 PVD 和 CVD 方法所无可比拟的，代表了薄膜淀积设备的发展方向。

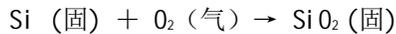
7 立式氧化炉 (VDF)

7.1 基本概念及工作原理

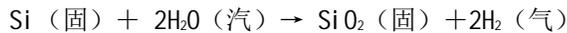
立式氧化炉是一种常压氧化和扩散设备，类似于低压化学气相淀积系统，一般工作在 1200℃ 高温下完成氧化、扩散、淀积、退火及合金等多项工艺流程。

与卧式炉相比，立式炉因占地面积小、自动化程度高和安全性好而逐渐取代卧式炉。它由工艺腔、温度控制器、硅舟装卸控制、气流控制器、尾气处理控制和微控制器等部分组成（见图 2.7）。

硅片热氧化在工艺腔（或称炉管）中进行。水平架放着整批硅片的硅舟由硅舟装卸机构驱动送进工艺腔。环绕在炉管外围的电阻加热器加热炉管，温控器精确控制以获得炉体中的恒温区。硅舟可在恒温区旋转从而提高加热的均匀性。气流控制器将高纯氧气（或高纯水蒸汽）也输送进炉管。在高温干氧气氛下，硅片表面发生干氧化反应：



若在高温水汽下，则发生湿氧化反应：



随着氧化反应的进行，固态致密的二氧化硅就牢固地附着在硅片表面。一批硅片加工结束后，必须即时清除炉管内残余气体和副产物，这是尾气处理装置的功能。工艺中微控制器按照设定的程序和工艺参数，自动控制工艺的全部操作。特别是恒温区的温度变化要控制在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 之内。氧化温度一般控制在 900°C 到 1200°C 之间，工艺前后的升降温过程也要严格控制。

7.2 主要技术性能

氧化炉的微控制器一般都具有 PID 算法自整定功能，对炉温、气流阀门动作进行自动控制，并管理全部工艺时序，可编辑存贮多条工艺曲线，每条工艺曲线有多个步骤，曲线间可以任意链接、重复。并且具有断电、超温和极限超温报警等多种安全保护功能。其主要技术参数如下：

工作温度范围： $600^\circ\text{C} \sim 1300^\circ\text{C}$

恒温区控制精度：优于 $\pm 0.5^\circ\text{C} / 600 \sim 1300^\circ\text{C}$

单点温度稳定性： $\pm 0.1 \sim 0.5^\circ\text{C} / 24\text{h} (600 \sim 1300^\circ\text{C})$

7.3 产品应用范围

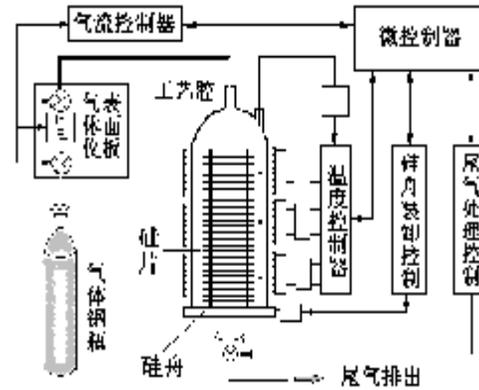


图 2.7—高温氧化炉结构示意图

立式氧化炉是半导体器件制造中非常关键的设备，最常用于生长栅氧的氧化膜。也常用于其它工艺中制造电介质膜、掺杂掩蔽膜、金属层间介质隔离膜、钝化膜和保护隔离膜，还可以用于扩散、退火及烧结等工艺。

7.4 技术发展趋势

传统的高温立式炉升降温时间长，热能耗费大，因而生产效率低，成本高。国外多使用小型立式快速升温炉，它采用最先进的升温元件、模块式温控器和特殊的硅片装载装置等，可以 80°C / 分钟升温循环，维持 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的工艺温度一致性，并明显改善硅片处理质量。

单片快速热处理 (RTP) 可在相当短的时间内将单个硅片加热至 $400\sim 1300^{\circ}\text{C}$ ，并能降低杂质和热耗，特别适合多腔集成，具有较强的先进性。

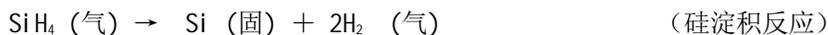
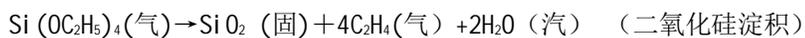
8 低压化学气相淀积系统 (LPCVD, Low Pressure Chemical Vapor Deposition System)

8.1 基本概念及工作原理

化学气相淀积系统是将反应物以气态形式输送到被加热的衬底表面发生化学反应淀积固态薄膜的设备。利用 CVD 几乎可以淀积半导体工艺中所需要的各种薄膜，因而在半导体制造中广泛使用低压 CVD (LPCVD)、等离子体增强型 CVD (PECVD) 和高密度等离子体 CVD (HDPCVD)。

LPCVD 系统是在早期的常压 ($1\times 10^5\text{Pa}$) CVD 基础上改进而来, 其反应腔的工作压强低到 $1\times 10^2\text{Pa}$ 。采用低压可使反应物更快更充分地到达衬底表面，从而可以密集摆放批量硅片 (150~200 片) 得以提高产量；反应所需的能量通过电加热来提供，工作温度一般为 $300\sim 900^{\circ}\text{C}$ 。

LPCVD 应用于硅器件工艺的主要化学反应如下例：



LPCVD 的炉体结构与高温氧化炉大体相同 (见图 2.8)，但增加了抽真空机构。炉管采用石英管制成，外围装有电阻加热器，外部和内部分别装有热电偶测温器。晶圆在石英舟中密集摆放，通过自动装卸片机构装进或取出。整机控制系统由温度控制器、压力控制器、气体控制器和炉微控制器组成。具体工作过程参见 2.7 节立式氧化炉。

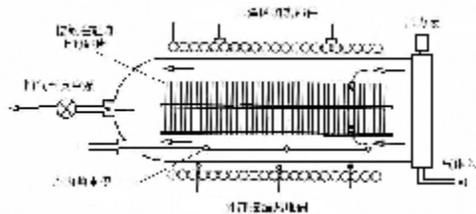


图 2.8—LPCVD 反应腔示意图

8.2 主要技术性能

主要技术参数如下:

工作温度范围: 350~1100°C 工作压力范围: 67Pa~133Pa
成膜厚度范围: 1000~6000Å 膜厚不均匀性: ≤±3%~5%

8.3 产品应用范围

LPCVD 设备用于半导体晶片上淀积 SiO₂ (TEOS 法或 SiH₄ 法)、Si₃N₄、Poly-Si、磷硅玻璃 (PSG)、硼磷硅玻璃 (BPSG)、氧化氮化硅及难熔金属硅化物等多种薄膜, 广泛应用于半导体器件和集成电路、MEMS 器件、光电子、电力电子等行业的生产工艺中。

8.4 技术发展趋势

LPCVD 是 CVD 淀积设备发展过程中的一个技术平台, 由于它的性能好、成本低、产出率高及不断的技术改进, 至今仍在超大规模集成电路生产中得到广泛应用。其技术发展的主要趋势是大片径 (300mm)、多腔集成 (包括工艺模块集成) 和高度自动化。

9 等离子体增强化学气相淀积系统 (PECVD, Plasma Enhanced CVD)

9.1 基本概念及工作原理

等离子体增强化学气相淀积系统是在反应腔中的低压气体上施加射频电场, 使气体发生辉光放电电离化出等离子体。等离子体具有很高的能量, 仅需将衬底晶片加热到 100~400°C 就能激发并维持 CVD 反应, 远远低于 LPCVD 所需的高温条件 (300~900°C), 故称为等离子体增强 CVD。这正是它的最大特点之一, 因而对于低熔点材料的膜淀积是非常适合的。并且 PECVD 成膜的台阶覆盖能力和隙孔沟槽的填充能力更是优于 LPCVD。

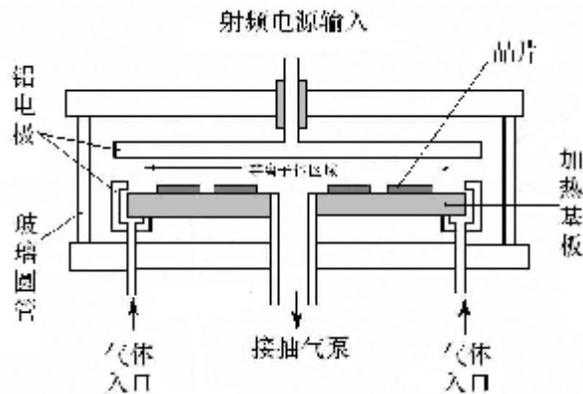
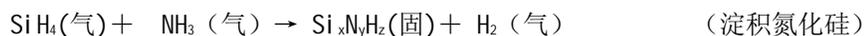
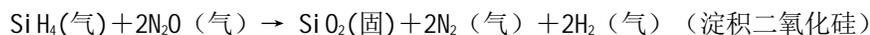


图 2.9—等离子体增强 CVD 反应室结构示意图

PECVD 应用于硅器件工艺的主要化学反应如下例:



PECVD 系统通常由反应腔、射频电源、气源系统、真空及压力控制、计算机控制系统等几部分组成。反应室的结构如图 2.9 所示，内有上下平行的两块电极板，射频电压加在上极上，下电极接地。射频电压使平板电极间产生等离子体放电。半导体晶片置于下电极托盘上，并用电阻加热器加热。工作气体由位于下电极周围的进气口进入，并流过放电区。整个工艺过程采用计算机通过对真空系统、工作压强、射频电源匹配、气体流量及工艺过程的全自动控制。

9.2 主要技术性能

由于采用射频功率源增强了放电能力，反应腔中电子和离子密度可达 $10^9 \sim 10^{12}$ 个/cm³；加之可在低真空氮气压条件下工作，从而大大提高了薄膜的生长速度。为尽量减小颗粒沾污，设备具有反应腔自清洗功能。

PECVD 的主要技术参数如下：

淀积温度范围：200~450℃ 工艺压强范围：13.3~266Pa

膜厚生长速度：30-300nm/min. 膜厚不均匀性：≤±3%~5%

9.3 产品应用范围

PECVD 适于在较低的工作温度下淀积 SiO₂、Si₃N₄、SiO_xN_y 等薄膜。广泛应用于半导体制造工艺中的多层布线介质层、表面钝化功能膜生长等工艺。

9.4 技术发展趋势

PECVD 至今仍是超大规模集成电路制造中关键的薄膜淀积设备。其发展的重点是大片径（300mm）、高度自动化、多腔集成和高产出率。目前国外最先进的 PECVD 在一个中心晶圆处理腔的基础上实现 12 个淀积台，可集成多达 3 个顺序工艺操作模块，产出率高达每小时处理 250 片 200mm 直径晶圆。在设备上集成标准工艺模块是工艺设备发展的创新趋势。

10 磁控溅射台(Magnetron Sputter Apparatus)

10.1 基本概念及工作原理

磁控溅射台是应用磁控溅射原理进行金属薄膜制备的半导体关键设备。

在半导体制造中，金属薄膜的制备常用真空蒸发和溅射的方法。低压惰性气体辉光放电产生的离子，经强电场加

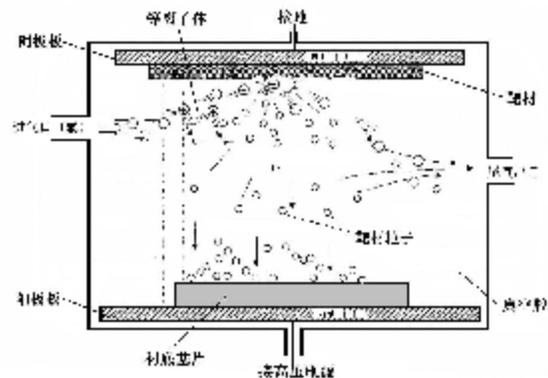


图 2.10—溅射镀膜原理示意图

速后携高能去轰击靶材，靶材表面的原子获得足够能量后会从靶材表面脱离出来，这种现象称为溅射。利用被轰击出来的靶材粒子淀积在基片表面成固体薄膜的物理气相淀积方法称为溅射镀膜(如图 2.10 所示)。

磁控溅射台相比通常的溅射镀膜设备，其特别之处是在辉光放电中利用磁场改变电子运动方向，束缚和延长电子的运动轨迹，从而提高了电子对工作气体的电离几率，并有效地利用了电子的能量，因此在形成高密度等离子体的辉光放电中，正离子对靶材溅射更为有效。同时受正交电磁场束缚的电子只能在其能量耗尽时才沉积到基片上。因此，磁控溅射镀膜具有“基片温度低、溅射（淀积）速度高”两大突出特点。它主要由真空室、磁控溅射源、射频电源、真空及充气系统、基片加热器及控制系统组成。

10.2 主要技术性能

磁控溅射设备能够淀积高温熔化和难溶金属，具有淀积并保持复杂合金原组分的能力，能连续淀积多种不同材料的多层薄膜而不需要改变加工室真空状态。其特别适于 200mm 或更大硅片上控制淀积均匀性高的薄膜。在镀膜之前，可以分别对衬底、靶材进行 RF 原位剥离清洗，以获得原子级清洁表面。

磁控溅射设备典型技术参数：

淀积速率： 6000~12000Å	基片温度： 低于 200℃
极限真空度： 低于 9×10^{-6} Pa	膜厚均匀性： 优于 $\pm 5\%$

10.3 产品应用范围

磁控溅射台可在硅片、砷化镓晶片、陶瓷、玻璃、石英等材料表面镀制 Al、Ti、Ta、Cu、W、Ni 等各种金属薄膜特别是难溶金属薄膜、合金膜或 SiO₂、非金属薄膜，还可镀制单层或多层膜。主要用于微电子、光电子、微机械等领域的器件制造工艺。

10.4 技术发展趋势

由于半导体制造工艺日益复杂，溅射设备正在向同一设备中可完成 PVD、CVD、RIE、ICP 等多种工艺制程的系统发展，这即是多腔集成系统。更需要适合大片径、高分辨率和高效率的溅射设备。

11 光刻机 (Stepper, Scanner)

11.1 基本概念及工作原理

光刻机是半导体制造中最关键的设备之一。当今发挥主导作用的光刻机仍以光学曝光成像为基础。光学光刻设备之所以使用得如此广泛而长久，主要因为它具有高的生产效率、优良的分辨率、低成本和易操作的优势。

伴随着半导体工业的飞速发展，至少已经出现过五代光刻机。第一代的接触式光刻机简单高效，可获得 $1\mu\text{m}$ 的良好分辨率，但掩模版的沾污和磨损成为致命问题。改进中产生的第二代接近式光刻机，由于紫外光的衍射发散反而降低了分辨率，只能用于线宽尺寸 $2\sim 4\mu\text{m}$ 的制程。这两代光刻机现已基本淘汰。第三代扫描投影光刻机克服了前两代的缺陷，曾在 70 年代末 80 年代初占据主导地位，但它只满足了 $1\mu\text{m}$ 的制造工艺。亚微米线宽尺寸的光刻需求，驱使分步重复光刻机诞生于 80 年代初，从 80 年代后期主导了半导体制造业，至今改进的机型仍在广泛使用。

分步重复光刻机(也称分步投影光刻机、步进光刻机)是利用光学系统投影成像的原理，将投影掩模版上的芯片图形以分步重复曝光的方式聚焦成像在涂有光刻胶的硅片上，实现高分辨率图形转印的设备。它由紫外光源（高压汞灯）、曝光快门、投影掩模台、投影透镜（精缩镜头）、精密工件台、自动对准系统和硅片自动传送等几个基本子系统构成（见图 2.11）。涂胶的硅片被自动传送到光刻机精密工件台的承片台上。

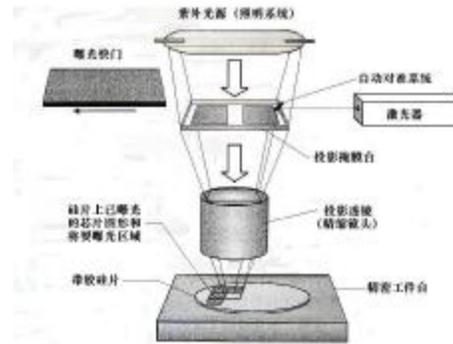


图 2.11—光刻机结构原理示意图

在这个平台上，硅片根据对准和调焦的需要可在 X、Y 方向被平移，或抬升、降低，或旋转、倾斜从而置于对准和聚焦范围内。一旦最佳聚焦和对准获得后，快门就被打开，使 UV 紫外光通过放置在投影掩模台上的掩模版，再经过投影透镜缩小数倍（通常为 4x 或 5x）而成像到带胶硅片上。当一个芯片图形曝光完成后，承片台会步进到硅片的下一个位置并重复对准和曝光过程（即“分步—重复”），直到整片硅片全部曝光完毕。

为适应 $26\text{mm}\times 33\text{mm}$ 大面积曝光场和 $0.25\mu\text{m}$ 及以下分辨率的要求，可称第五代光刻设备的步进扫描光刻机集步进重复光刻机的高分辨率和扫描投影光刻机的大视场、高效率于一身，成为制造大尺寸芯片、小于 $0.25\mu\text{m}$ 线宽的超大规模集成电路大生产的主流曝光设备。在其上采用波长为 248nm 的氟化氪（KrF）准分子激光器取代汞灯照明后，使曝光线宽很快延伸到 $0.13\mu\text{m}$ 。采用 193nm 波长的氟化氩（ArF）准分子激光器作照明光源的步进扫描光刻机至今仍是 100nm 及以下线宽甚大规模集成电路的主流曝光设备。

11.2 主要技术性能

光刻机除自身提高性能外，同时采用相移掩模（PSM）、光学邻近矫正（OPC）以及离轴照明（OAI）多种光学增强技术等辅助措施，不仅有效提高了光刻分辨率，还大大改善了光刻图形对比度，增加了焦深。

具有相当高的生产效率：对于 200mm 直径硅片每小时一般可曝光 80 片，最高达 120 片。对于 300mm 直径硅片每小时一般可曝光 70~90 片，最高达 100 片。

表 2.1 列出了主流光刻机的曝光场尺寸、分辨率和套准精度三项主要参数。

表 2.1 主流光刻机主要性能参数表

曝光方式	波长 (nm)	照明光源	透镜数值孔径 (NA)	曝光场尺寸 (mm)	分辨率 (μm)	套准精度 (nm)
步进重复	436	汞灯 g 线	0.40~0.48	20×20	0.80~0.50	90~70
步进重复	365	汞灯 i 线	0.48~0.63	22×22	0.50~0.25	70~45
步进重复	248	KrF 激光	0.40~0.65	22×22	0.25~0.13	55~30
扫描投影	248	KrF 激光	0.40~0.75	26×33	0.18~0.13	55~30
扫描投影	193	ArF 激光	0.45~0.75	26×33	0.13~0.09	45~25

11.3 产品应用范围

光刻机主要用于半导体制造工艺中对晶片进行对准和曝光。分步重复光刻机主要用于超大规模集成电路制造中的硅片曝光工艺。扫描投影光刻机主要用于超大规模集成电路关键层图形的曝光。

11.4 技术发展趋势

以 193nm ArF 扫描投影光刻机为基础，采用浸没式曝光技术，已证实可将光刻分辨率提高到 45nm，进一步改进和完善相关技术有可能达到 32nm 甚至 22nm。极紫外光刻 (EUVL) 和电子束光刻 (EPL) 作为下一代曝光机，展现其分辨率向 90~35nm 延伸的潜力，是光刻设备技术发展的基本趋势。纳米压印和无掩膜光刻需要解决颇多难题才能显现应用前景。

12 反应离子刻蚀系统 (RIE, Reactive Ion Etch System)

12.1 基本概念及工作原理

反应离子刻蚀系统是目前使用广泛的干法刻蚀设备。RIE 刻蚀是以物理溅射作用为主兼有化学反应的过程，正是这种化学和物理反应的相互促进使得反应离子刻蚀具有良好的形貌控制能力(各向异性)、较高的选择比、可接受的刻蚀速率。

典型的反应离子刻蚀系统主要由反应腔、真空及压力控制、射频源和匹配器、静电吸盘和硅片温度控制、刻蚀终点检测、气体传送和流量控制、整机控制系统及系统软件等几部分组成(见图 2.12)。

RIE 系统的工作原理：运输到反应腔的刻蚀气体在频率通常为 13.56MHz 射频电场作用下产生辉光放电，形成的等离子体中具有强化学活性的游离基与被刻蚀的材料发生化学反应，生成能够由气流带走的挥发性化合物，从而实现化学刻蚀。另一方面，正离子在阴极附近得

到非常有效的加速，垂直轰击硅片表面。这种离子轰击可大大加快硅片表面的化学反应及反应生成物的解附，从而导致较高的刻蚀速率。正是由于离子轰击的存在，才使得各向异性刻蚀得以实现。

12.2 主要技术性能

RIE 各向异性的刻蚀特点使其较适合刻蚀亚微米线条及深宽比大和具有垂直侧壁等电路图形。所具有的物理效应能刻蚀难以用纯化学方法刻蚀的材料，如 SiO_2 及难熔金属。其主要技术参数如下：

刻蚀速率：2000~7850 $\text{\AA}/\text{min}$

刻蚀选择比：高于 7 : 1

刻蚀均匀性：优于 $\pm 5\%$

适用线宽：0.8~0.13 μm

12.3 产品应用范围

RIE 系统已广泛应用于半导体和集成电路制造中，可刻蚀各种绝缘介质材料、多晶硅和金属等。具体工艺用途有：二氧化硅刻蚀、氮化硅刻蚀、多晶硅刻蚀、去除光刻胶和光刻胶清理、背面刻蚀等。

12.4 技术发展趋势

RIE 系统是干法刻蚀设备发展过程中一个技术平台。它对气体的流量和工艺压力分开控制，并且采用了精密的 MFC 质量流量控制器元件，大大改善了工艺的可重复性。经不断改进现已广泛用于超大规模集成电路刻蚀工艺。



图 2.12—反应离子刻蚀系统

13 ICP 等离子体刻蚀系统 (ICP, Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching System)

13.1 基本概念及工作原理

感应耦合等离子体刻蚀系统是半导体制造中干法刻蚀的关键工艺设备。与 RIE 相比较，ICP 采用了双射频电源，如图 2.13 所示，其中一个射频电源通过螺旋线圈控制高密度等离子体的产生。另一射频电源施加偏置电场控制等离子体轰击能量。实现了离子浓度和离子轰击强度分开控制，使刻蚀速率、选择比、均匀性都得到提高。

ICP 反应腔体主要由温度控制、气路控制、射

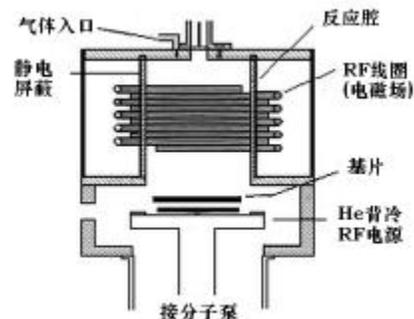


图 2.13—I CP 反应腔结构示意图

频电源和真空控制系统四部分组成。刻蚀气体由反应腔上方引入，其流量由气路系统通过质量流量计控制。两套射频源各尽其能。真空控制系统自动控制和保持反应腔的工作压力，及时将刻蚀生成物从硅片两边由涡轮分子泵抽走。温度控制（He 背冷）系统可使基片的温度满足不同的刻蚀需要。

13.2 主要技术性能

ICP 具有智能过程控制功能，包括跳转、循环和调用工艺配方的操作。配置有干涉式终点探测和刻蚀深度测量仪器，自动完成终点检测。对硅片采用氦气背部冷却装置，可稳定控制硅片温度的均匀性。工作中可记录刻蚀过程的全部数据资料，提供查阅或工艺分析。具有高的刻蚀速率、低的表面损伤和高的深宽比，工艺可重复性强。典型技术参数如下：

等离子源：13.56 MHz, 1200 W 射频偏置：13.56 MHz, 600 W
 刻蚀速率：0.35~2.0 μm/min 刻蚀深宽比：30 : 1 以上

13.3 产品应用范围

ICP 刻蚀系统能对多种材料进行刻蚀。在硅集成电路制造中，ICP 刻蚀应用于通孔刻蚀、栅挖槽选择刻蚀等工艺。在其它半导体器件和光电器件生产中，可利用 ICP 对 GaAs, InP, GaP, GaN 等材料进行良好刻蚀。

13.4 技术发展趋势

ICP 刻蚀已成为超大规模集成电路深刻蚀工艺的利器。目前 300mm 片径、多腔集成和高度自动化的设备已广泛使用。因而等离子刻蚀设备的发展出现新的趋势：适应器件不断专用化和集成度不断提高的要求，向着应用的多样化、金属刻蚀与电介质刻蚀工艺的融合以及反应腔的精密匹配三个方向发展。

14 离子注入机 (IBI, Ion Beam Implanting)

14.1 基本概念及工作原理

掺杂是将所需杂质按要求的浓度与分布，掺入半导体以使形成器件的目的。在半导体和 IC 制造中，早期使用的扩散法近于淘汰，目前主要采用离子注入法。这是因为离子注入机已经发展成为半导体工艺中最先进最关键的设备之一。

如图 2.14 所示，离子注入机主要由离子源、离子分析器、加速管、聚焦器、扫描装置和工艺腔、真空系统、控制系统及监控系统等部分组成。

离子注入过程中，先将注入物质送入离子源，辉光电离出注入元素的离子。在吸极负电压作用下，从离子源的阳极

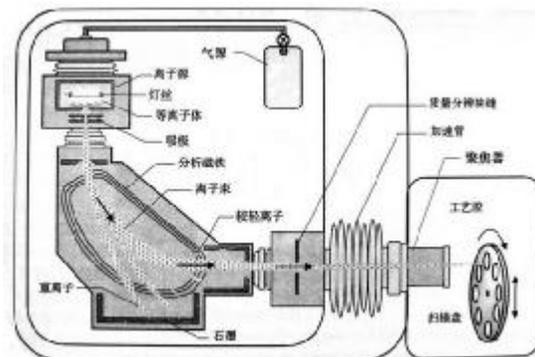


图 2.14—离子注入机结构示意图

小孔引出离子束流进入离子分析器，由磁分析器将需要的杂质离子从混合的粒子束中分析出来形成所需束流。束流在加速管电场的作用下获得很高的能量，再经聚焦形成小的束斑，使离子有足够的动能注入到晶片中。在工艺腔真空条件下采用 X-Y 静电扫描、全机械扫描，或静电与机械混合扫描，使离子束在晶片上均匀注入。完成离子注入的晶片要用高温炉或 RTP 在 800-1000 °C 的高温下进行退火处理，以使离子注入时产生的晶格损伤得以恢复，并激活杂质。同时也达到防止晶片表面污染的效果。

离子注入掺杂与扩散掺杂相比，具有独特的优点：一是可以精密地控制扩散法难以得到的低浓度杂质分布；二是杂质的横向扩散小，适合亚微米线条的掺杂；三是大面积掺杂的均匀性可优于 $\pm 0.5\%$ ；四是高能离子可穿透掩蔽层进行注入。

离子束的注入角度通常偏离晶片法线 7° 左右，以防止发生沟道效应（即离子不与原子碰撞而直接进入晶片深层）。

14.2 主要技术性能

离子注入机按束流能量区分为低能 ($< 100\text{KeV}$)、中能 ($100\sim 300\text{KeV}$)、高能 ($300\sim 1000\text{KeV}$) 和兆伏机 ($\geq 1000\text{KeV}$)；按束流大小可区分为中束流 ($1\sim 2\text{mA}$) 和强束流 ($2\sim 30\text{mA}$) 两种，分别适用于不同的掺杂要求。

离子注入机的典型技术参数如下：

能量范围：	5~1000 KeV 以上	束流范围：	100 μA ~3500 μA
不均匀性：	$\pm 0.5\sim 0.75\%$	可重复性：	$\pm 0.5\sim 0.75\%$

14.3 产品应用范围

离子注入机基本取代了扩散炉成为半导体和 IC 制造中唯一的掺杂设备，广泛用于包括倒掺杂阱、源 / 漏、超浅结、轻掺杂漏区、多晶硅栅、MOS 栅阈值调整、深埋层、穿通阻挡层、沟槽电容器和 SIMOX（注氧隔离）等关键制程的注入掺杂。

14.4 技术发展趋势

就高能离子注入机而言，迫切需要提高束流、降低 X 射线、发展射频 4 极透镜加速器，在多功能的基础上实现全自动控制。

为适应 $\Phi 300\text{mm}$ 晶圆、 $0.13\ \mu\text{m}$ 及更小特征尺寸的超浅结低能注入的要求，需要重点开发低能大束、小体积高能注入机，超强束流注氧机及聚焦离子束注入机。

对于 45nm 及其以下离子注入工艺，机械扫描式单晶片离子注入机、大角度离子注入机是掺杂设备的发展方向。

15 化学机械抛光机 (CMP, Chemical Mechanical Planarization)

15.1 基本概念及工作原理

化学机械抛光机是以化学与机械抛光为主体，集清洗、甩干、在线检测、终点检测等功能于一体的全局平坦化设备；是集成电路向超微细化、布线多层化、组装薄型化发展过程中对平坦化工艺更高要求的产物。当前 CMP 设备已是 $\Phi 200\text{mm}$ 和 $\Phi 300\text{mm}$ 晶圆、深亚微米线宽 IC 制造必备工艺设备。

CMP 设备的主体主要由粘附着抛光垫的转盘、固定硅片的磨头和磨料喷头三部分构成（如图 2.15 所示）。转盘在精密

主轴的带动下以 300r/min 左右的速度旋转，自旋的磨头下真空吸附着硅片并面向转盘上的抛光垫，磨料喷头将含有研磨粉和化学品的混合液磨料喷洒在抛光垫上。吸附有磨料的聚亚胺酯抛光垫对硅片进行化学腐蚀和机械研磨双

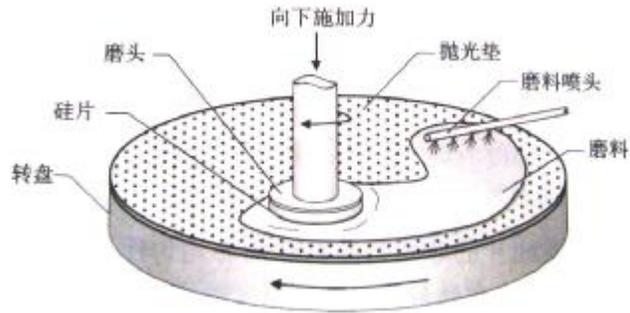


图 2.15—化学机械抛光机原理示意图

重作用。磨料通常是含有超精细硅胶颗粒的 KOH 溶液或过氧化氢与精细氧化铝粉配置而成的胶体溶液，利用磨料液与硅的水合作用或与金属的氧化作用，生成一层可溶性的表面层；再通过细小柔软、带有负电荷的研磨胶粒的吸附作用，以及抛光垫的摩擦作用，及时除去反应产物，从而连续地在硅片表面进行化学与机械抛光。

为提高抛光的均匀性，需要精密控制研磨头压力，并采取多层结构的衬膜、施加背压以及弹性隔膜等补偿措施。抛光垫是决定抛光速率和平坦化能力的重要耗材，使用过程中常把软硬不同的多个抛光垫叠在转盘上来获得恰当的抛光垫硬度。若采用多个转盘或多个磨头，可分别进行不同的研磨抛光工序或不同材料的研磨抛光，从而提高生产效率。在研磨抛光过程中可通过电机电流变化或采用光学干涉法进行膜层厚度的在线检测和终点检测，磨抛后立即投入清洗工序，以减少颗粒沾污保证硅片的加工质量。

15.2 主要技术性能

磨头定位环上采用独立的压力控制技术，可有效提高硅片磨抛的均匀性。

全自动控制加工过程，对抛光液种类、流量、转盘转速、磨头转速、研磨压力等工艺参数均能按标准工艺实施有效控制并清洗甩干，实现“干进干出”。

具有对抛光垫的原位修整功能以提高硅片片间均匀性优于 2%。

主要技术参数：

主轴转速范围：0~700r/min	抛光压力范围：5~700MPa
最大线速度：180~500m/min	生产率：40~70p/h

15.3 产品应用范围

CMP 设备起初主要用于原始硅片、氧化物、钨、层间介质等晶体膜材料的研磨抛光。目前

对于 200mm 和 300mm 晶圆、0.18 μm 及以下图形线宽采用多层互连结构及浅沟道隔离制程中，绝缘层、导体、层间介质、镶嵌金属（W、Al、Cu、Au 等）、多晶硅、硅氧化物等都必须使用 CMP 设备进行平坦化处理。CMP 则成为唯一的芯片制作工艺全局平坦化设备。

15.4 技术发展趋势

CMP 设备发展的方向主要是量产 300mm 晶圆制作加工、采用铜互连工艺中的平坦化为主。目前虽有几项新技术出现，但最根本的仍是 CMP 自身关键技术的不断创新和突破，即：高精度研磨头的研发，特殊材料的研磨方式，终点检测技术等。另外，如何克服 RC 值随层数增加问题、原本镀铜区中的研磨缺损问题，都是今后需要进一步研发解决的问题。

16 探针测试台 (VPT, Wafer prober Test)

16.1 基本概念及工作原理

探针测试台是硅片上待测器件与测试仪之间的机电连接设备。封装之前硅片上的全部芯片都要用探针测试台进行功能测试，其目的是要确定哪些芯片是合格品，哪些是废品。在封装之前，报废的芯片要被剔除，合格芯片则封装为 IC 成品。

探针测试台由精密工作台、承片台、探针卡以及探边器、打点器、整机控制及驱动系统组成（见图 2.16）。

测试过程：待测硅片自动传送到承片台，用真空吸附在承片台面。x-y 电机驱动精密工作台将硅片上的一个起始芯片精确对准探针卡，承片台 z 向抬升，探针卡上的探针尖分别准确接触到芯片上相对应的压焊点。此时，测试仪将测试信号通过针尖与压焊点的接触输入芯片进行功能测试。如果“测试合格”信号反馈到控制系统，则该芯片测试完毕，承片台下降，探针与芯片分离。这时 x 向或 y 向电机驱动工作台运行，将下一个待测芯片移动到测试位，承片台、探针卡、测试仪等重复上述操作。若反馈给测试仪的信号为“不合格”，控制系统则驱动打点器在该芯片上打上墨点标记。依此进行，直到硅片上 x 方向的一行芯片测试完毕，探边器信号则通知控制系统驱动 y 向电机运行到硅片的下一行芯片继续进行测试，直到整片硅片上的芯片全部测试完成。

16.2 主要技术性能

探针测试台的工作原理比较简单，但超大规模 IC 的微细尺寸和复杂功能对探针测试台的技术性能要求越来越高。特别是工作台、承片台和探针卡的位置精度、重复精度都接近了亚微米量级，可靠性和生产效率也接近极限。现列举普通探针测试台的主要技术参数如下：

承片台 Z 向重复精度：优于 $\pm 1.0 \mu\text{m}$



图 2.16—探针测试台

X-Y 工件台重复精度：优于 $\pm 1.0 \mu\text{m}$

X-Y 工件台定位精度： $\pm 4.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$

16.3 产品应用范围

探针测试台适用于半导体器件和集成电路、非光敏元件的自动中测，与测试仪配合可自动完成器件芯片的精密电参数测试及功能测试。

16.4 技术发展趋势

随着硅片直径增大、芯片集成度提高、电路功能日趋复杂等因素的增长，芯片中测所需的探针卡已容纳超过 25000 支接触探针，对针尖的共面性和位置精度都达到了亚微米量级。高精度、高效率、高度自动化是对探针测试台的必然要求。另外一种技术发展是由集成电路设计者对芯片本身开发内置自测系统。还有，迅速发展的圆片级封装可能导致芯片功能测试和电路成品测试合为一步进行。

17 晶片减薄机 (Back-side Grinding)

2.17.1 基本概念及工作原理

在前道工序制造过程中，为避免晶片的加工破损，晶片都切得较厚（依据晶片直径从 50mm~300mm，厚度约为 250~780 μm ）。但是厚的晶片不易划切为单颗芯片，并且也不易散热，对使用性能造成不利影响。薄的芯片在键合和封装过程中还有益于减小热应力，对减小集成电路成品的体积和重量也是有益的。因此，晶片在准备进行封装之前，必须被减薄到 200 μm 上下。

晶片减薄也称背磨，用晶片减薄机来完成。较先进的减薄机采用 In-Feed 垂直切深进给磨削原理设计制造。它在保证晶片表面质量提高磨削效率前提下，使磨削区域内磨削力最小，减小了晶片破碎的可能性。它主要由转动卡盘（工作台）、三工位承片台、厚度测量传感器、粗磨主轴及磨轮、精磨主轴及磨轮、控制及驱动系统组成（见图 2.20）。所要加工的晶片正面（有电路芯片的一面）粘贴到减薄膜上，再将减薄膜及晶片吸附到能旋转的承片台上。高速旋转的磨削主轴带动杯型磨轮通过晶片旋转中心形成垂直方向的均匀进给磨削，承片台带动晶片自身旋转形成横向进给运动，配合操作对晶片实现减薄。其中的两个承片台可同时进行粗磨和精磨，厚度测量探头实施在线厚度检测，到达预定厚度时磨轮与晶片脱离，转动卡盘可更换一个工位，将一个新装上的晶

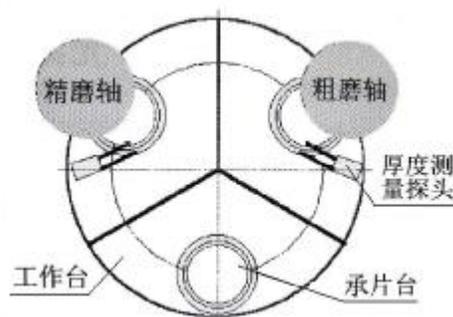


图 2.20— 晶片减薄机结构示意图

片转到粗磨工位，与此同时精磨工位的晶片转到空置工位被取下。依次进行，连续加工减薄晶片。

17.2 主要技术性能

晶片减薄机的典型技术参数：

转速范围：1000~6000r/min 进给速度：0.001~4.8mm/min

测量重复精度：优于 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 承片台转速：0~300r/min.

17.3 产品应用范围

晶片减薄机主要用于后封装晶片背面减薄工艺，也可用于硬脆材料圆片表面磨削工艺。该类设备可磨削的材料主要有半导体硅、锗、砷化镓、工业陶瓷等。

17.4 技术发展趋势

芯片的超薄化是集成电路发展的必然趋势。目前为提高减薄质量，适应自动化，设备已将减薄和抛光功能合为一体，可实现从粗磨、精磨到抛光整个加工过程。

18 晶圆划片机 (DS, Die Sawing)

18.1 基本概念及工作原理

划片机是用来将晶圆上的每个芯片划切成独立芯片的设备。它主要由主轴(含Z轴)、工作台(包括X轴、Y轴、 θ 轴)、对准系统、控制系统等组成，应用刀具(金刚砂轮)与晶圆表面强力磨削的机理。装卡着刀具并由Z轴上下驱动的主轴系统是强力磨削的执行部件。承载待切晶圆的工作台由x、y和 θ 电机驱动，可在对准系统的控制下实现晶圆的精密对准定位(见图2.18)。

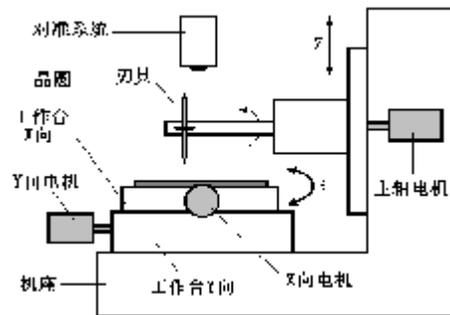


图 2.18—晶圆划片机示意图

划切操作时，主轴带动刀具高速旋转并自上而下使刀具与待切晶圆准确接触；工作台承载着晶圆在x轴驱动下沿水平方向从起点到终点完成一次划切。随后主轴由Z电机驱动向上升起，工作台沿y轴移动一个管芯的宽度到下一切割线的位置，同时晶圆返回到x轴切割起点。此时刀具向下至切割深度，开始新的一次切割操作。依此重复，直至Y向所有的切线全部完成。这时在刀具与晶圆脱离的情况下，工作台旋转 90° ，晶圆的X向与Y向精确调换，然后继续前述过程，直到整片晶圆切割完成。由于刀具仅切入晶圆厚度的90%左右，所以划切

过的晶圆并未断裂。直到后续的粘片工序才在“取片”操作中被顶针顶开。实际工艺中，晶圆是被粘贴在称为蓝膜的薄膜上进行划切的。划切后的晶圆必须经过彻底的清洗以避免碎屑的沾污。

18.2 主要技术性能

划片机典型技术参数：

主轴转速范围： 3000~40000rpm X轴切割速度： 0.1~400mm/s

Y轴全程精度： 优于 $\pm 5\mu\text{m}$ Z轴重复定位精度： 优于 $\pm 3\mu\text{m}$

18.3 产品应用范围

划片机主要用于半导体和集成电路、发光二极管晶圆，铌酸锂、压电陶瓷、石英、砷化镓、蓝宝石、氧化铝、氧化铁、玻璃等材料的划切加工。

18.4 技术发展趋势

全自动砂轮划片机除划切主功能外，还具有清洗、烘干和砂轮磨损自动修正补偿功能。激光划片机已投入使用。如何满足 300mm 晶圆超薄芯片的划切要求是设备发展的基本方向。对于圆片级封装中多层叠片的划切是对划片机的另一挑战。

19 引线键合机 (Wire Bonder)

19.1 基本概念及工作原理

引线键合机是将芯片表面的压焊点与引线框架或基座上的电极内端进行电连接（见图 2.19）的设备。设备通常采用热压键合、超声键合或热超声球键合之一种或两种机理制成。

热压键合中，采用毛细管劈刀将金线（或铝线）定位在被加热的芯片压焊点并施加压力，热能和压力同时作用使引线与压焊点形成键合，也称为楔形键合。

超声键合是利用超声机械振动带动丝线与压焊点表面进行摩擦，使氧化膜破碎，摩擦产生的热量使纯净的金属表面之间发生扩散形成冶金键合。它可在相同或不同的金属间形成键合，也属楔形键合。

热超声球键合是利用电火花使金丝端部熔化成球形，然后对金丝和压焊点同时施加热能和超声能，使接触面产生变形并破坏界面的氧化膜使其活性化，在芯片压焊点上形成球焊，在基座（管壳）引线内端上形成楔焊，完成芯片和管壳的连接。

引线键合机大多采用热超声球键合机理制成。主要由 x、y、z 工作台、光学和图像自动定位系统、EFO 电子打火物料供给完成自动上下料，形成器、超声波发生器和热台等部件组成。

19.2 主要技术性能

键合速度： 85~65 ms / 线

键合面积： 50mm × 66mm

键合精度： ±5~3.5 μm

引线直径范围： 15~50 μm

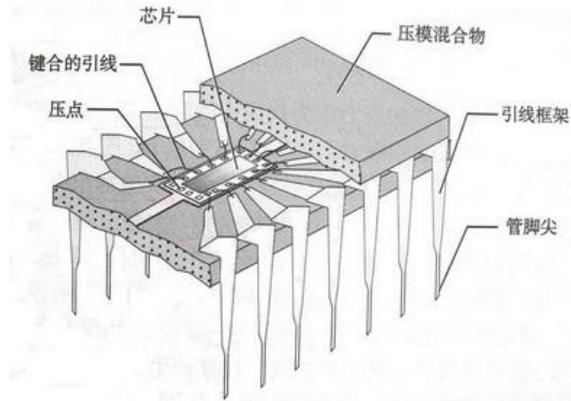


图 2.19——引线键合示意图

19.3 产品应用范围

引线键合机适用于引线框架式单芯片封装的引线键合，经调整也可进行标准 LOOP 和标准 BGA2 的引线焊接。

19.4 技术发展趋势

随着封装技术的发展和封装结构的日益复杂，对引线键合的要求也越来越高。首先是高精度的要求：在焊盘间距仅 45 μm、引线线径仅 20 μm 的条件下，键合精度要达到 ±3 μm 以内；其次是高速度：要达到 8~15 线/秒；第三是键合面积大且具有多种键合功能。适合圆片级封装的引线键合是引线键合设备的发展目标。

20 精密工模具与精密零件

20.1 概述

军用电子元器件包括微电子（如引线框架与封装管壳）、真空电子（如电子枪零件）、光电子（如光纤用拉丝模）、机电组件（金属或塑料零组件）和电子元件，都离不开精密零件。精密工模具与精密零件已成为军用电子元器件的重要支撑之一。精密模具技术涉及模具的设计技术、制造技术和质量控制技术，需要有一流装备、一流管理和一流人才来保障。精密工模具、优质零件材料、精密零件制造和检测设备是制造精密零件的基础。由于精密模具和精密零件制造设备少则几十万美元，多则几百万美元，如果每个军用电子元器件承制单位都建设一个精密模具和精密零件生产平台，由于分散投资，缺乏软技术支持，国防投资会增大好几倍，往往设备利用率低，周期长，见效慢。建议相对集中投资，充分利用现有资源，选用技术进步较快的现有国内企业，再适当投资发挥其优势，进行社会化、专业化协作，提高军用电子元器件精密零组件技术质量水平，促进军用电子元器件的质量和可靠性升级换代。

20.2 主要技术性能

（1）级进模：在一副冲模中能完成冲裁，打弯，拉伸，侧冲，有必要可在模具内冲压过程自动攻丝。冲速在 200-800 次/分钟，最高可达 1400 次/分钟，总寿命 ≥ 一亿次；模具精度：工位位置精度 ≤ 0.005mm，凸凹模冲裁间隙均匀度 ≤ 0.005mm。高速冲裁模具大多选用硬质合金制作凸凹模，必须具备有加工硬质合金的设备和技術能力。

(2) 注塑模：形腔数一般在 2—16 腔，视产品特征可作到 36 腔。形腔精度和形腔位置精度 $\leq 0.005\text{mm}$ ；动定模形腔合模精度 $\leq 0.005\text{mm}$ ；动定模形腔多为磨削件和电火花成型件镶拼组合式；动定模形腔均为合金钢材料，热处理硬度 HRC52—58；模具总寿命可达 100 万模次。

(3) 精密嵌塑模：这类模具由于要使冲制成型的金属零件放入模具形腔中，注塑后使塑料包着部分金属件成为金属与塑料一体的零件。这类零件不仅对嵌塑模技术指标要求高，同时对要放入的金属冲压件与嵌塑模的配合精度要求也是很高的。这类模具总寿命也已达 100 万模次。

(4) 深引伸模：这类模具主要用于高引伸系数的金属壳体零件。模具多为多工位机械手传递模，冲床为多工位冲床。

2. 20.3 制造精密模具和精密零件的关键设备

(1) 电加工：CNC 慢走丝线切割、CNC 电火花成型机。加工精度 $\leq 0.003\text{mm}$

(2) 磨削加工设备：精密平面磨、CNC 座标磨、CNC 光学曲线磨，CNC 成型磨和手工操作小型成型磨床，加工精度 $\leq 0.003\text{mm}$

(3) 高速精密加工中心。加工精度 $\leq 0.008\text{mm}$

(4) 必要的质量控制所需测量仪器：数显工具显微镜，影像测量仪，数显投影仪，三坐标测量仪和测微仪等。

(5) 精密零件制造的基础就是精密模具，还应配备相应的数控精密车床、冲压设备、电镀设备、注塑设备和超声波清洗设备等。

20.4 精密零件制造的新技术

(1) 带料生产技术：带料冲压—带料电镀—带料注塑—编带包装—SMT 装配，这是一种先进的、低成本、高质量、高效率大生产方式，它适合大批量自动化生产。对军品生产可在短期内形成批量生产能力，满足军工配套急需。对小批量、多品种生产，可采用分段式短带料加专用工装柔性生产方式。

(2) 冷挤压代替车制，特点是无屑加工，精度更高；精密铸造代替镗、铣加工，特点是效率高、材料省、精度高。

(3) CAD、CAE、CAM 技术—这是现代精密零件开发和精密模具设计制造与产品质量判断的必要手段。实用软件：设计软件 Auto desk.AutoCAD；MECHANICAL DESKTOP；MISSLER TOPSOLID；Pro Engineer；CAM 加工编程软件：CAXA；Cimatron；MasterCAM；CIMCOEdit；磨削加工软编程件：macs；统计分析软件：MINITAB；SPSS；财务、销售、库管软件：k3；天喻数据防扩散系统：Intekey 加密系统等。

(4) 制造环境：保证加工精度的环境温度控制，符合 ISO14000、QS16949 和环保要求。

完