

# 第 1 章 绪 论

## 学习目标

通过本章的学习，要求了解以下几点：

- (1) 了解半导体薄膜技术是硅集成电路中重要的一部分；
- (2) 简单了解薄膜技术的发展历史；
- (3) 薄膜的研究工作是如何开始的；
- (4) 薄膜技术的发展趋势；
- (5) 简单了解几种常用的薄膜制备工艺。

硅集成电路无疑是我们这个时代所创造的奇迹之一，正是这种能够将数以千万计的元器件集成于一块面积只有几平方厘米的硅芯片上的能力造就了今天的信息时代。在过去的几十年里，芯片的复杂性一直是以指数增长的速度在不断增加的，这主要是由于器件尺寸的持续缩小、器件工艺技术的不断改进及一些创新方法实现某些特定功能的灵巧发明。

硅集成电路技术可以说综合应用了多种不同领域的科学技术成果。光刻技术中所使用的能够制作出各种微细图形的光学分布重复光刻机，就是傅里叶光学理论在众多最先进的工程技术领域中的应用之一。等离子刻蚀技术则包含当今制造工艺技术中某些最复杂的化学反应过程，而离子注入技术则利用高能物理的研究成果，薄膜技术的应用就是人们开发新材料和新器件的研究结晶，通过不同的技术手段在半导体材料上进行薄膜的生长、腐蚀，形成所需要的各种结构，实现所设计的器件的功能，半导体薄膜技术，已经成为硅集成电路制造工艺中不可或缺的重要一环。

在一千多年以前，人们就开始利用贵金属薄膜的制备技术来制作陶瓷器皿表面的彩釉。在几个世纪前，人们就已经发现了薄膜产生的干涉现象。光学薄膜是薄膜技术中最早被深入研究的薄膜。随着光学透镜的发展，各种增透膜、减反射膜、分光膜等被精确地制备、监测和分析研究。对薄膜形成机理的研究始于 20 世纪 20 年代，为了解决白炽灯内壁形成的不透明的薄膜，人们开始研究这个薄膜形成的过程，这是研究真空蒸发镀膜的开始。因此，精确地研究薄膜形成的机理是与电真空技术的发展有密切联系的。科学和生产实践的发展事实说明，电子学的发展深刻地影响着当今社会的各个领域，而在电子学发展过程中，新材料和新器件的制造起着重要的作用，薄膜科学就是开发新材料和新器件非常重要的研究领域。电子器件的发展，尺寸越来越小，响应速度越来越快，如此发展趋势要求研究亚微米和纳米级的薄膜制造技术，这类薄膜技术包括单晶薄膜、多晶薄膜、非晶薄膜和有机分子膜等。这是科学技术的发展趋势，也是薄膜科学技术的发展趋势。

薄膜的研究工作首先是从研究如何制备薄膜这种特殊形态的材料开始的。绝大多数的薄膜是涂覆或生长在衬底之上的，由于衬底材料和薄膜材料种类繁多，因此发展了各种薄膜制备技术。薄膜的制备技术主要分为：物理气相沉积（PVD），如蒸发、溅射、离子镀、等离子镀和分子束外延等方法；化学气相沉积（CVD），如气相沉积、液相沉积、电解沉积、辉光放电沉积和金属有机物化学气相沉积（MOCVD）等方法；此外，还有许多独特的制备方法，如离子注入、各种涂覆方法等。下面简单介绍几种常用的薄膜制备工艺。

### 1. 磁控溅射工艺

磁控溅射工艺是 PVD 工艺的一种，一般的溅射法可被用于制备金属、半导体、绝缘体等多材料，且具有设备简单、易于控制、镀膜面积大和附着力强等优点。而 20 世纪 70 年代发展起来的磁控溅射法更是实现了高速、低温、低损伤。磁控溅射原理图如图 1-1 所示。溅射工艺是以一定能量的粒子（离子或中性原子、分子）轰击固体表面，使固体近表面的原子或分子获得足够大的能量而最终逸出固体表面的工艺。溅射只能在一定的真空状态下进行。溅射工艺主要用于溅射刻蚀和薄膜沉积两个方面。溅射刻蚀时，被刻蚀的材料置于靶极位置，受氩离子的轰击进行刻蚀。刻蚀速率与靶极材料的溅射产额、离子流密度和溅射室的真空度等因素有关。溅射刻蚀时，应尽可能从溅射室中除去溅出的靶极原子。常用的方法是引入反应气体，使之与溅出的靶极原子反应生成挥发性气体，通过真空系统从溅射室中排出。沉积薄膜时，溅射源置于靶极，受氩离子轰击后发生溅射。如果靶材是单质的，则在衬底上生成靶极物质的单质薄膜；若在溅射室内有意识地引入反应气体，使之与溅出的靶材原子发生化学反应而沉积于衬底，便可形成靶极材料的化合物薄膜。通常，制取化合物或合金薄膜是用化合物或合金靶直接进行溅射而得的。在溅射中，溅出的原子是与具有数千电子伏的高能离子交换能量后飞溅出来的，其能量较高，往往比蒸发原子高 1~2 个数量级，因而用溅射法形成的薄膜与衬底的粘附性较蒸发更佳。若在溅射时衬底加适当的偏压，可以兼顾衬底的清洁处理，这对生成薄膜的台阶覆盖也有好处。另外，用溅射法可以制备不能用蒸发工艺制备的高熔点、低蒸气压物质膜，便于制备化合物或合金的薄膜。溅射主要有离子束溅射和等离子体溅射两种方法。

### 2. 真空蒸发工艺

真空蒸发工艺是将固体材料置于高真空环境中加热，使之升华或蒸发并沉积在特定的衬底上，以获得薄膜的工艺方法。真空蒸发工艺在微电子技术中主要用于制作有源元件、器件的接触及其金属互连、高精度低温度系数的薄膜电阻器，以及薄膜电容器的绝缘介质和电极等。蒸发主要有电子束蒸发、多源蒸发、瞬时蒸发、激光蒸发和反应蒸发等方法。真空蒸发所得到的薄膜，一般都是多晶膜或无定形膜，经历成核和成膜两个过程。蒸发的原子（或分子）碰撞到基片时，或是永久附着在基片上，或是吸附后再蒸发而离开基片，其中有一部分直接从基片表面反射回去。真空蒸发多晶薄膜的结构和性质，与蒸发速度、

衬底温度有密切关系。一般来说，衬底温度越低，蒸发速率越高，膜的晶粒越细越致密。真空蒸发原理图如图 1-2 所示。

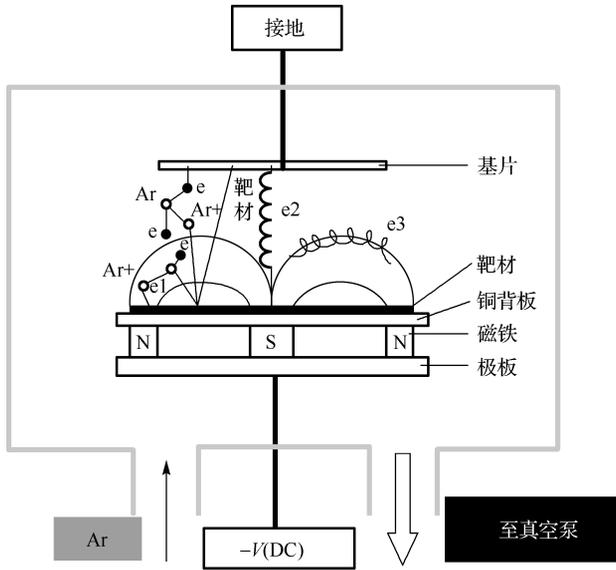


图 1-1 磁控溅射原理图

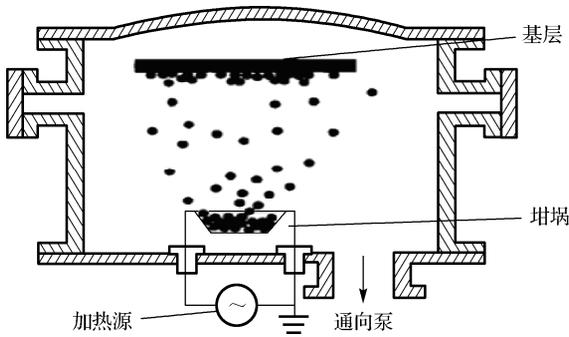


图 1-2 真空蒸发原理图

### 3. MBE（分子束外延）

MBE（Molecular Beam Epitaxy）分子束外延是一种新的晶体生长技术，其方法是將半导体衬底放置在超高真空的腔体中，需要生长的单晶物质按元素的不同分别放在喷射炉中，由分别加热到相应温度的各元素喷射出的分子流能在半导体衬底上生长出极薄的单晶体和几种物质交替的超晶格结构。MBE 工艺腔体示意图如图 1-3 所示。分子束外延主要研究的是不同结构和不同材料的晶体和超晶格生长。MBE 工艺温度低，可以严格控制外延层的厚度和薄膜的组成及掺杂浓度，但是 MBE 的生长速度缓慢，衬底加工面积小。

MBE 作为成熟的技术早已经应用到了微波器件和光电器件的制作中，但是由于

MBE 设备昂贵，所以普及率并不高。MBE 能对半导体异质结进行选择性的掺杂，大大地扩展了掺杂半导体所能达到的性能和现象的范围，但同时对晶体生长的参数提出了更为严格的要求，如何控制晶体生长参数是 MBE 的关键技术之一。MBE 作为一种高级真空蒸发形式，随着器件性能要求的不断提高，其作为不可缺少的工艺和手段将发挥重要的作用。

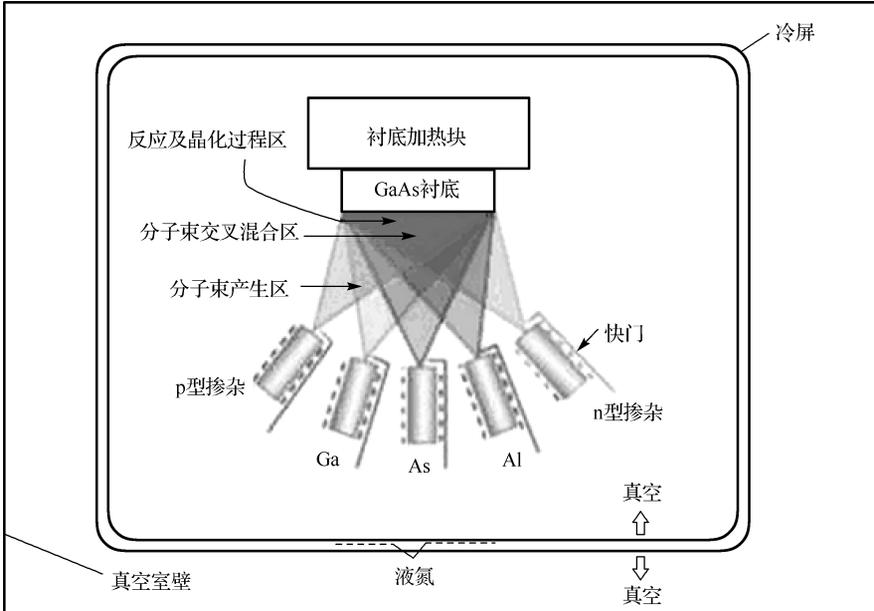


图 1-3 MBE 工艺腔体示意图

目前世界上许多国家和地区都在研究 MBE 技术，MBE 技术的发展推动了以砷化镓为主的 III-V 族半导体及其他多元多层异质材料的生长，大大地促进了新型微电子技术领域的发展。

#### 4. MOCVD

MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) 金属有机化合物化学气相沉积是在气相外延生长 (VPE) 的基础上发展起来的一种新型气相外延生长技术。MOCVD 是以 III 族、II 族元素的有机化合物和 V、VI 族元素的氢化物等作为晶体生长源材料的，以热分解反应方式在衬底上进行气相外延，生长各种 III-V 族、II-VI 族化合物半导体及它们的多元固溶体的薄层单晶材料。MOCVD 工作示意图如图 1-4 所示。通常 MOCVD 系统中的晶体生长都是在常压或低压 (10~100Torr) 下通  $H_2$  的冷壁石英 (不锈钢) 反应室中进行的，衬底温度为  $500^{\circ}C \sim 1200^{\circ}C$ ，用射频感应加热石墨基座 (衬底晶片在石墨基座上方)， $H_2$  通过温度可控的液体源鼓泡携带金属有机物到生长区。MOCVD 几乎可以生长所有化合物及合金半导体，这种工艺方法非常适合生长各种异质结构材料，MOCVD 可以生长超薄的外延层，并且台阶覆盖率好，能够获得很陡的界面过渡。MOCVD 的薄膜生长速度易于控制，可以生长高纯度的材料，能够在大面积的半导体衬底上面生长薄膜，均匀性良好。

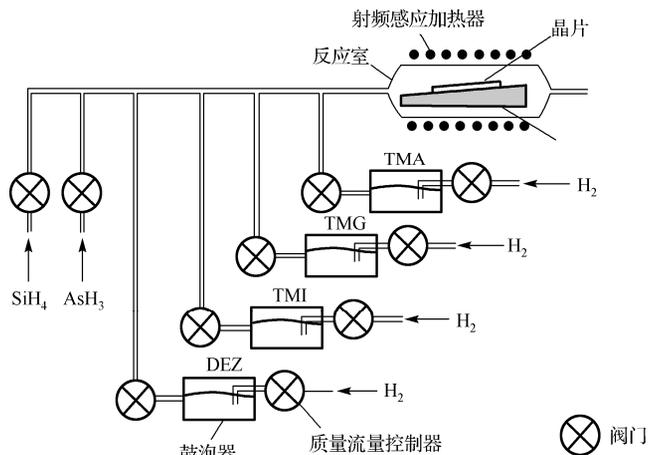


图 1-4 MOCVD 工作示意图

## 5. Spin-coating

Spin-coating 就是采用类似光刻胶匀胶的方式，通过旋转涂覆的方式在半导体衬底上获得厚度一致的薄膜材料的工艺方法。Spin-coating 原理示意图如图 1-5 所示。通常在半导体衬底的中心滴入需要旋涂的材料，然后通过低速旋转半导体衬底，让这种材料逐渐覆盖浸润整个半导体衬底表面，然后通过高速旋转达到所要求材料的薄膜厚度。Spin-coating 的工艺参数主要是由旋转速度、时间和所旋涂材料的粘度等决定的。

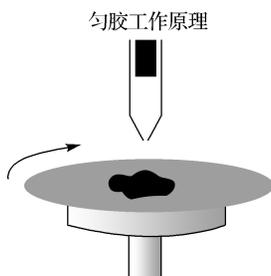


图 1-5 Spin-coating 原理示意图

在集成电路加工工艺过程中，需要利用各种薄膜，这些薄膜中，有些是器件的结构层，如多晶硅薄膜太阳能电池中的多晶硅薄膜，有些是集成电路中加工过程中起辅助作用的薄膜，如离子注入工艺中利用二氧化硅薄膜作为阻挡层，在完成离子注入工艺后，这层阻挡层薄膜通常会被去除。

## 本章小结

本章对薄膜科学技术的发展做了简要的介绍，并介绍了目前在产业界常用的几种半导体薄膜加工技术。通过本章的学习，可以对半导体薄膜技术有简单的了解，对进一步学习半导体薄膜技术起到启蒙作用。

## 习 题

1. 简述半导体薄膜技术的发展趋势。
2. 薄膜制造技术主要有哪几种？
3. MOCVD 工艺具有哪些优点和特点？
4. Spin-coating 工艺影响薄膜质量的因素有哪些？
5. MBE 的主要研究内容是什么？