

# 薄膜沉积工艺在集成电路制造中的应用

殷兴平

芯恩(青岛)集成电路有限公司 山东 青岛 266426

**摘要:** 薄膜沉积工艺作为集成电路制造中的关键技术之一,对提升芯片性能、可靠性和降低成本具有重要意义。本文将从薄膜沉积工艺的基本原理出发,详细探讨其在集成电路制造中的应用,包括主要技术类型、工艺特点以及未来发展趋势。

**关键词:** 集成电路; 薄膜沉积; 应用

## 引言

集成电路(Integrated Circuit, 简称IC)作为电子信息领域的核心技术,对现代社会的发展起着至关重要的作用。在IC的研发和制造过程中,薄膜沉积工艺被广泛应用,成为不可或缺的一部分。薄膜沉积技术通过在不同的基底上沉积薄膜材料,形成具有特定功能的薄膜层,从而满足IC制造中的多种需求。

### 1 薄膜沉积工艺基本原理

薄膜沉积工艺是指通过物理或化学方法,在基底材料表面形成一层或多层薄膜的过程。根据沉积原理的不同,薄膜沉积工艺主要分为物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)和原子层沉积(ALD)三大类。

#### 1.1 物理气相沉积(PVD)

物理气相沉积(PVD)是一种利用物理方法,如蒸发、溅射等,将材料源表面的原子或分子转移到基底上形成薄膜的技术。这一过程中,不涉及化学反应,而是依靠物理力量实现材料的转移与沉积。真空蒸镀是PVD技术中的一种典型方法。在真空环境中,通过加热材料源使其蒸发,蒸发的原子或分子在基底表面凝聚形成薄膜。这种方法简单易行,适用于多种材料的沉积,但薄膜的附着力与均匀性可能受到一定影响。溅射镀膜则是一种更为复杂的PVD技术。它利用高能粒子(如离子、电子等)轰击材料源表面,使原子或分子溅射出来并沉积在基底上。这种方法能够形成附着力强、密度高的薄膜,且适用于多种难熔金属与化合物的沉积。溅射镀膜还分为直流溅射、射频溅射、磁控溅射等多种类型,以满足不同应用需求。离子镀膜则是将蒸发或溅射出的原子或分子在电场或磁场的作用下加速,使其以离子的形式沉积在基底上。这种方法能够进一步提高薄膜的附着力与致密性,且能够形成具有特殊功能的薄膜,如耐磨、耐腐蚀等。PVD技术因其沉积的薄膜附着力强、密度高、纯度高且易于控制厚度等优点,在光学、电子、

机械等领域得到了广泛应用。

#### 1.2 化学气相沉积(CVD)

化学气相沉积(CVD)是一种通过化学反应在基底表面生成固态薄膜的技术。与PVD不同,CVD技术中涉及化学反应,通过气态前驱体的热解或化学反应形成所需的薄膜材料。在CVD过程中,气态前驱体被引入反应室中,并在加热的基底上发生化学反应。这些反应可能是热解反应、氧化还原反应、水解反应等,具体取决于前驱体的种类与反应条件。反应生成的固态产物沉积在基底表面,形成所需的薄膜。CVD技术具有沉积速率高、薄膜均匀性好、能够形成复杂组成与结构的薄膜等优点。这些优势使得CVD技术在半导体和光电器件的制造中得到了广泛应用。例如,在半导体制造中,CVD技术可用于制造晶体管、集成电路等元件中的薄膜层;在光电器件制造中,它则可用于制造太阳能电池、发光二极管等器件中的薄膜层。此外,CVD技术还具有灵活性与可扩展性。通过调整前驱体的种类、反应条件与基底材料,可以实现对薄膜成分、结构与性能的精确控制。这使得CVD技术成为研究新材料、开发新功能器件的重要手段之一。

#### 1.3 原子层沉积(ALD)

原子层沉积(ALD)是一种将物质以单原子层形式逐层沉积在基底表面的技术。与PVD和CVD相比,ALD技术具有更为精确的厚度控制能力和优异的台阶覆盖性。在ALD过程中,前驱体气体与反应气体被交替通入反应室中。首先,前驱体气体在基底表面发生化学吸附,形成一层单原子层的薄膜。然后,通入反应气体与前驱体气体发生化学反应,生成所需的薄膜材料并释放副产物。通过重复这一过程,可以逐层沉积出具有精确厚度的薄膜。ALD技术的关键在于化学吸附的自限制性。即每一层沉积完成后,基底表面会被完全覆盖,从而阻止进一步的前驱体吸附与反应<sup>[1]</sup>。这种自限制性确保

了每一层沉积的均匀性与精确性。同时,ALD技术还具有优异的台阶覆盖性,能够在复杂结构的基底上形成均匀的薄膜。由于ALD技术具有精确的厚度控制能力和优异的台阶覆盖性,它特别适用于高要求的纳米结构器件制造。例如,在半导体制造中,ALD技术可用于制造纳米尺度的晶体管、存储器等元件;在纳米材料研究中,它则可用于制备具有特殊功能的纳米薄膜与纳米结构。

## 2 薄膜沉积工艺在集成电路制造中的应用

### 2.1 金属沉积

金属沉积是IC制造中不可或缺的一环,它承担着连接电路、制作电极以及提供导电通路的重要任务。在金属沉积过程中,物理气相沉积(PVD)技术因其能够沉积超纯金属、过渡金属氮化物薄膜等特性,而被广泛应用于铝垫、金属硬掩膜、铜阻挡层和铜籽晶层的沉积中。铝垫作为IC中的主要导电材料之一,其沉积过程需要高度的纯净度和均匀性。PVD技术通过真空蒸镀或溅射镀膜的方式,能够在基底上形成附着力强、密度高的铝薄膜,满足IC对导电性能的要求。同时,金属硬掩膜在IC制造中起着保护电路、防止刻蚀等作用。PVD技术能够沉积出具有高硬度、耐腐蚀性的金属薄膜,如钛、钨等,为IC的后续加工提供有力的支撑。铜作为另一种重要的导电材料,在IC中广泛应用于互连线。然而,铜与硅等基底材料之间容易发生扩散,导致电路性能下降。因此,在铜沉积之前,需要先沉积一层铜阻挡层来阻止铜的扩散。PVD技术能够沉积出致密的钽、钌等金属薄膜作为铜阻挡层,有效地解决了铜扩散的问题。此外,铜籽晶层的沉积也是铜互连线制造中的关键步骤。PVD技术通过溅射镀膜的方式,在基底上形成一层均匀的铜籽晶层,为后续的电镀铜过程提供良好的起始点。

### 2.2 介质层沉积

在IC制造中,不同的电路组件之间需要进行隔离,以减少相互之间的干扰。介质层沉积就是实现这一目的的关键技术。化学气相沉积(CVD)技术作为沉积介质层的主要方法,能够制备出高质量的氮化物、氧化物、氮氧化物、碳化物和多晶硅等薄膜。栅氧化层是IC中的关键组件之一,它决定了晶体管的开关速度和阈值电压等性能参数。CVD技术能够沉积出具有高纯度、高致密性的二氧化硅薄膜作为栅氧化层,满足IC对高性能的要求。同时,层间介质在IC中起着隔离不同金属层、防止短路等作用。CVD技术能够沉积出具有低介电常数、高击穿电压的介质薄膜,如氟化硅玻璃、氮化硅等,为IC的多层布线提供了可靠的隔离层<sup>[1]</sup>。此外,阻挡层在IC制造中也起着重要的作用。它能够阻止金属离子、水分等

杂质向器件内部扩散,保护器件的性能。CVD技术能够沉积出具有高密度、高阻挡性能的金属氮化物或金属氧化物薄膜作为阻挡层,如钛氮化物、钨氮化物等。

### 2.3 高K金属栅沉积

随着IC制程的不断缩小,传统栅氧化层已无法满足性能需求。高K金属栅(HKMG)技术应运而生,成为解决这一问题的有效途径。其中,高K介质层和金属栅极的沉积是高K金属栅技术的关键步骤。高K介质层具有比传统二氧化硅更高的介电常数,能够在相同的厚度下提供更大的电容效应,从而提高晶体管的开关速度。原子层沉积(ALD)技术因其精确的厚度控制和优异的台阶覆盖性,成为高K介质层沉积的首选方法。通过交替通入前驱体气体和反应气体,ALD技术能够在基底表面逐层沉积出均匀、致密的高K介质层,如铪氧化物、锆氧化物等。金属栅极作为晶体管的另一个重要组成部分,其材料的选择和沉积工艺对器件性能有着重要影响。在HKMG技术中,金属栅极通常采用PVD或CVD技术进行沉积。通过优化沉积参数和选择合适的金属材料,如钛、钽等,可以制备出具有高导电性、高稳定性的金属栅极。高K金属栅技术的引入,不仅提高了IC的性能,还降低了功耗和延迟。而ALD、PVD和CVD等薄膜沉积技术作为其主要实现手段,为HKMG技术的成功应用提供了有力的技术支持。

### 2.4 三维结构填充

在先进IC制造中,三维结构(如FinFET和3D NAND)的引入对薄膜沉积技术提出了更高的要求。这些三维结构具有高深宽比、复杂形状等特点,传统的薄膜沉积技术难以实现均匀的覆盖和填充。而ALD技术因其卓越的台阶覆盖能力,在三维结构填充中展现出独特优势。在FinFET结构中,鳍片(Fin)的侧壁需要被均匀地覆盖和填充以形成导电通道。ALD技术通过精确控制每层薄膜的厚度和均匀性,能够实现鳍片侧壁的统一覆盖,从而提高器件的性能和稳定性。同时,在3D NAND结构中,存储单元之间的隔离层需要被精确地填充以防止漏电流和串扰。ALD技术能够沉积出具有高致密性、低漏电流的介质薄膜,满足3D NAND对隔离层的要求<sup>[3]</sup>。此外,ALD技术还能够实现多层薄膜的交替沉积,形成复杂的叠层结构。这种叠层结构在先进IC制造中具有重要的应用价值,如用于制备多层布线、多层存储等。通过优化ALD技术的沉积参数和选择合适的材料组合,可以制备出具有高性能、高稳定性的叠层结构。

## 3 薄膜沉积工艺的发展趋势

### 3.1 新材料的应用

在IC技术不断突破的背景下,新型材料的研究与应用成为推动行业发展的关键力量。二维材料,如石墨烯、二维硫化钼等,因其独特的电学、光学和机械性能,被视为未来IC制造中的潜在替代材料。这些材料不仅具有极高的载流子迁移率和优异的热导性,还能在纳米尺度上实现精确的电子调控,为构建高性能、低功耗的电子器件提供了可能。然而,二维材料的薄膜沉积技术尚处于起步阶段,如何实现大面积、高质量、可控制的沉积,成为当前研究的重点。与此同时,拓扑绝缘体作为一种新型量子材料,其表面态具有独特的导电性,而内部则保持绝缘状态,这一特性为开发新型电子器件和量子计算提供了广阔的应用前景。然而,拓扑绝缘体的薄膜沉积同样面临诸多挑战,如如何精确控制其厚度和成分,以及如何实现与其他材料的兼容等,都是未来研究需要解决的问题。为了应对这些挑战,薄膜沉积技术和设备的研发将成为关键。未来,将看到更多针对新型材料特性的沉积技术被开发出来,如基于化学气相沉积(CVD)的二维材料生长技术、利用原子层沉积(ALD)实现拓扑绝缘体精确控制的技术等。这些技术的突破将极大地推动新型材料在IC制造中的应用,开启集成电路的新时代。

### 3.2 高精度控制

随着IC制程的不断缩小,对薄膜沉积的精度要求达到了前所未有的高度。未来,薄膜沉积技术将更加注重高精度控制,以确保在纳米级尺度上实现厚度的均匀性、成分的精确度和表面的低粗糙度。为了实现这一目标,薄膜沉积设备将不断升级,采用更先进的控制系统和监测技术。例如,通过引入高精度传感器和实时反馈机制,可以实时监测沉积过程中的厚度和成分变化,从而及时调整沉积参数,确保沉积质量的稳定性<sup>[4]</sup>。此外,利用先进的计算模拟技术,可以预测不同沉积条件下的薄膜生长行为,为优化沉积工艺提供理论指导。高精度控制不仅要求设备技术的提升,还需要对沉积机理有更深入的理解。未来,将看到更多关于薄膜生长动力学、

界面反应机制等方面的研究,这些研究将为高精度控制提供科学依据,推动IC制程技术的不断进步。

### 3.3 绿色环保

在传统薄膜沉积工艺中,废水和废气的排放对环境造成了严重影响。随着环保意识的日益增强,绿色环保的薄膜沉积技术成为未来发展的必然趋势。为了实现这一目标,需要从多个方面入手。首先,优化沉积工艺,减少有害物质的产生和排放。例如,通过改进前驱体气体的选择和使用效率,可以降低废气中的有害物质含量。其次,开发低污染、低能耗的沉积技术。例如,利用太阳能、风能等可再生能源作为沉积过程中的能源来源,可以显著降低能耗和碳排放。此外,推动沉积材料的可回收和再利用也是实现绿色环保的重要途径。通过开发高效的回收技术和再利用机制,可以减少资源的浪费和环境的负担。

### 结语

薄膜沉积工艺在集成电路制造中发挥着至关重要的作用。随着技术的不断进步和应用领域的拓展,薄膜沉积工艺将在提高IC性能、降低成本和推动科技进步方面发挥更加重要的作用。未来,新材料的应用、高精度控制和绿色环保将是薄膜沉积工艺发展的重要方向。

### 参考文献

- [1]邱洪宇,王馨颐,段彰,等.GaAs衬底上等离子体增强原子层沉积GaN薄膜[J].半导体光电,2023,44(04):573-579.
- [2]孙振,黄峰,袁玮,等.FeCrNi中熵合金薄膜电沉积工艺正交优化及其耐蚀性[J].电镀与涂饰,2023,42(23):32-39.
- [3]徐玉琦,李晴雯,钟敏.化学气相沉积制备高c轴取向的BiOI薄膜[J].人工晶体学报,2024,53(05):841-847.
- [4]覃志伟.超硬精密光学薄膜沉积解决方案[C]//广东省真空学会(Guangdong Vacuum Society),广东省真空产业技术创新联盟,广东省半导体装备及零部件学会.第七届粤港澳真空科技创新发展论坛暨2023年广东省真空学会学术年会论文集.广东汇成真空科技股份有限公司,;2023:1.