

常见薄膜沉积工艺中影响薄膜质量的主要因素探究

樊中军

(中国建材国际工程集团有限公司, 上海 200383)

摘要 薄膜沉积工艺是现代材料科学领域极具代表性的工业应用技术, 凭借其精准可控的材料制备能力, 在电子信息、光学器件、高端制造、新能源开发等众多产业领域发挥着不可替代的核心作用。本文以磁控溅射、离子蒸发、近空间升华三种主流薄膜沉积工艺为研究对象, 采用理论分析与实践经验相结合的方式, 着重探究影响薄膜质量的主要因素, 以期在不同应用场景下的薄膜制备工艺优化提供有益参考。

关键词 磁控溅射; 离子蒸发; 近空间升华; 升华源

中图分类号: TN304.055

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.041

0 引言

当前工业中常见的薄膜沉积方式主要分为物理气相沉积 (PVD) 与化学气相沉积 (CVD), 其中, 磁控溅射、离子蒸发与近空间升华这三种方式的应用场景最为普遍。磁控溅射技术具有沉积速率稳定, 薄膜均匀性与致密等优点, 在微电子、光学薄膜沉积工艺中应用较为广泛; 离子蒸发技术对于要求膜层附着力强、沉积面不规则且对挠度较为敏感的场景较为适合; 近空间升华法则具有膜层致密性好, 且镀膜工艺控制简单的特点, 在新能源等领域应用较为广泛。目前, 国内外的学者针对某一种薄膜沉积工艺的特点与控制做了大量的研究, 但对于不同方式之间的系统性对比与多参数协调控制机制的研究与分析较少。因此, 本文通过对磁控溅射、离子蒸发与近空间升华这三种常用薄膜沉积方式下的工艺参数对薄膜质量的影响规律进行探究, 旨在为用户提供一套清晰的技术路径选择依据, 并为各种复杂与交互薄膜沉积工艺下的情况提供优化方案与缺陷改进措施。

1 磁控溅射

1. 溅射功率。溅射功率的大小除了可以影响薄膜的厚度之外, 还能使得薄膜更加致密, 也就是说, 在基板与阴极之间间距不变, 且离子气体浓度不变的情况下, 提升沉积功率就意味着提高沉积速率, 在微观上可以使得带电粒子的能量更高, 宏观上可以使得薄膜更加致密。但是, 过于高的功率也可能增大膜的内应力, 使得薄膜在冷热交替或高温高湿的环境下出现裂纹或脱落。

2. 工作气压。当前主流的溅射用工作气体为氩气, 这主要得益于氩气具有良好的化学惰性与容易电离的特性。一般来说, 随着氩气的供应流量的增加, 当其他条件不变化时, 流量越大, 离子浓度越高, 薄膜沉积速度也越高。单流量的增加并不意味着供气压力较大。

3. 靶基距 (靶到基底距离)。所谓靶基距, 顾名思义, 就是靶材表面与镀膜基板之间的距离。因为带电子受磁场的作用, 使得其密度分布在空间内并不呈均匀分布, 距离靶材越近, 离子浓度越高, 薄膜沉积速率越高, 但这一距离并非越近越好, 因为距离越近, 虽然沉积速率得到了提高, 但也可能引起薄膜的均匀性变差, 而且靶基距越小, 则基板表面的热量分布越不均匀, 这种不均匀会使得薄膜内部产生大小不一的内应力, 降低薄膜的可靠性^[1]。

4. 基底温度。在有些溅射工艺中, 为了提高薄膜的附着力, 需要在沉积前提高基板表面的温度, 根据材料不同, 工艺需求不同, 对基板表面温度的要求也不同。基板表面温度提高, 沉积原子的迁移率也会提高, 这会使得薄膜更加致密, 微观结晶更加均匀, 膜层附着力有效提高。

5. 基板偏压。在恒电压溅射模式下, 基板偏压越大, 则离子轰击能量越大, 使得薄膜更加致密, 表面粗糙度更加良好, 微观空洞越少。但过大的偏压反而会导致薄膜内部应力急剧增大, 附着力下降, 甚至使得薄膜受到损伤, 出现破裂甚至色变等不良现象。

6. 靶材品质。溅射靶材的品质也是影响最终薄膜

作者简介: 樊中军 (1981-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 微电子薄膜沉积工艺。

品质的原因之一。其中主要指的是靶材的纯度，纯度不够的情况下，靶材中的杂质会进入薄膜中，从而影响薄膜的导电性、绝缘性与耐腐蚀性。有些杂质会使得靶材异常放气、起弧，从而影响膜层的均匀性。当然，片面追求越高纯度是没有实际意义的，因为纯度越高，往往也意味着靶材的成本越高。

7. 基底与预处理（决定附着力）。基底的洁净状况会直接影响到薄膜的最终品质。但这种影响又分为消极与积极两种情况。基地表面的粉尘、油污、指印、刮痕、毛屑、水雾等都是薄膜质量的消极因素，这些基板的表面缺陷在薄膜沉积后，可能会更加明显，尤其是要求薄膜具有透光性的情况下。在实际生产中，建议采用化学清洗，离子清洗/刻蚀，加热等手段做基板的预处理^[2]。

8. 设备与腔体条件。在磁控溅射工艺中，为确保薄膜品质，沉积腔的底真空都要求越低越好，因为残留气体中的 H_2O 、 O_2 、 N_2 等会污染膜层，使得膜层变色、附着力差，特别是在CVD模式下，还有可能使得膜层变异。

9. 其他因素。工装 & 夹具的形制，以及基板与工装 & 夹具的装配方式也会影响薄膜的品质，尤其是在立式镀膜环境下，夹具的挡边位置、尺寸需要与基板的旋转方向相互适配，否则可能会因为局部遮挡而造成薄膜分布不均，在基板表面留下条纹状的情况。

2 离子蒸发

1. 蒸发源与蒸发工艺（决定膜层基础）。从原理上来讲，当镀料原子被等离子体激发后变成高能带电离子后，会在强电场作用下向基板移动并最终成膜。所以，外加电场的强弱将直接影响成膜的速度。弱电场环境下，薄膜内应力释放均匀，膜层的致密性较好，但同时生产效率也低，而且一旦沉积速率低于溅射玻璃速率，膜层将停止生长，镀膜工艺无法持续。适当地提高电场强度并提升镀率可以有效防止这种情况的发生^[3]。

2. 坩埚舟材质与状态。相比磁控溅射的靶材，离子蒸发所用的镀料载体——坩埚舟的体积要小很多，但是，因为工艺的不同，坩埚舟的材质要求除了具有熔点高、低蒸汽压、化学惰性好、耐高温等一般特性外，还不能与膜料发生反应。目前，主流材质主要包括陶瓷与难熔金属。材质不匹配，就会产生合金反应，最终使得膜层遭到污染。

3. 基底温度。在生产中，为了提高薄膜的附着力，往往需要在生产前对蒸发伞具与基板进行预热。提高预热温度，有利于增强原子的迁移能力，使得膜层更加的致密，附着力更好。但无限制地提高预热温度则

没必要，过高的预热温度除了增加生产的能耗之外，还有可能使得膜的内应力增大，膜层老化变色，甚至有可能使得伞具机体变形。

4. 离子束浓度。从原理上来讲，可以通过提高离子源的工作电压来提高离子束的浓度，而离子束的浓度越高，则离子轰击的强度就会提高，这种变化可以提高薄膜的致密性，使得膜层表面更加光滑，也能提高膜层的附着力，在一些对薄膜镜面质量要求较高的工艺环境下，这种方式使用比较广泛。

5. 辅助气体纯度。这类气体主要指的是气相电离所用的主气体（Ar等），以及反应型离子蒸发工艺中所用的其他气体（ O_2 、 N_2 等）。纯度不高的气体会造成膜面发黄、发黑、发雾、附着力变差等质量问题^[4]。

6. 真空系统。与磁控溅射工艺类似，离子蒸发镀膜工艺对真空系统的要求也比较严格，沉积腔内的底真空越高，薄膜蒸发所受的影响就会越小，薄膜质量也会更加稳定。在众多的残余杂质气体中，残余水、氧气以及碳氢化合物是导致薄膜发雾、氧化变色以及薄膜附着力变差的主要原因之一。

7. 基底与预处理。基底的表面质量状况也是影响薄膜质量的主要因素之一，这种表面质量主要体现在油污、手印、粉尘、刮伤、水痕、毛屑、表面粗糙度等方面。一般来说，在镀膜前都需要对基底表面做前置的清洗或预处理，其目的便是尽可能消除上述的不良现象，否则薄膜就会出现起泡、针孔、附着力变差甚至脱模的现象。但是需要说明的是，清洗无法消除刮伤等深度缺陷，对于这类缺陷，如果使用场景不能接受，就应该果断剔除，因为在蒸发镀膜的高温下，某类基体（玻璃或硅片）有可能会发生破裂甚至破碎，从而影响设备的安全。

8. 其他因素。工装 & 伞具的转动速度也会影响薄膜的沉积质量。从原理上来说，工装 & 伞具的转速影响的是膜厚的均匀性，这就要求在镀膜过程中这一速度需要尽可能地保持不变，或快或慢的速度变化都会影响薄膜的沉积厚度，而要保持这个速度恒定，除了采用抗干扰性能良好的伺服系统外，基板在工装 & 伞具上的安装状况（遮挡、角度、距离等因素）也会影响薄膜的表面质量，比如薄膜的均匀性、色差、边缘发雾等不良现象。

3 近空间升华

1. 升华源温度。通常情况下，当升华源温度提高后，升华速率也将提高，沉积速率也将明显提高。但需要注意的是，随着沉积时间的发展，升华源内原料会逐渐减小，这种减小会逐步地影响升华的速率，因为蒸

汽到基板表面的距离有了改变,所以在近空间升华工艺中,需要对薄膜的厚度做定期的测量或检查,一旦发现薄膜厚度开始逐渐减小,则需要适时地调整升华源的温度参数,给予必要的补偿。而这种调整切记不可大开大合,除了担心基体碎裂外,更重要的原因是温度的提升对膜厚的增加并非一直处于直线变化状态,也就是说,虽然源温度对薄膜厚度控制很重要,但并非唯一决定因素。事实上,过高的温度会使得薄膜的晶粒变得粗大,增加后续的工艺处理难度,也会加速腔体的污染,缩短设备保养时间^[5]。

2. 基底温度。在近空间升华工艺中,基底温度是另外一个影响薄膜品质的因素之一。基于基板的耐受温度之下,提高基板温度可以使得薄膜中的分子晶粒生长得更大,同时也能提高膜层的附着力。一方面,过高的基体温度有可能会造成基体变形较大,膜应力增大,甚至薄膜的翘曲与开裂;另一方面,当基板的温度比周围腔室的温度高的情况下,蒸汽分子可能更容易在腔体而不是在基板上沉积。然而,过低的基板温度会使得薄膜内部的微小空洞较多,分子晶体生长不够而显得较小,附着力也会变差。如果镀的是导电薄膜,那薄膜的电学性能也会变差。

3. 源-基间距。源-基间距就是升华源与基板之间的间距。升华蒸汽由升华源漂移到基板并形成薄膜,这一气相传输路径越大,蒸汽能量散射越多,所沉积的薄膜内部结构往往比较疏松,均匀性也不好,相反,间距越小,则能量散射越少,沉积速率越高,所沉积的薄膜也更加致密。但过于小的间距,也可能导致局部污染物刮伤薄膜,特别是当基底温度很高,基板变形较大的情况下,基板可能会直接与污染物或升华源部件接触造成刮伤甚至破碎。

4. 腔体气氛与压力。几乎所有真空镀膜工艺都会要求设备的基底真空尽可能的低,近空间升华工艺也不例外,虽然它不像磁控溅射一样需要达到高真空环境,但一般的低真空环境也是需要保证的,应尽可能地减少残余气体中的水蒸气、氧气等杂质气体的含量,降低薄膜污染,保证薄膜导电特性,减少气泡,提高薄膜的附着力。

5. 基板移动速度。基板移动速度越快,则薄膜沉积时间越短,膜厚越薄;反之,则沉积时间越长,膜厚越厚。除考虑薄膜厚度这一基本指标之外,还要注意的是:时间短,薄膜薄,虽然内应力可能小,但微观针孔可能会增加;时间长,薄膜厚,虽然晶粒生长可能较好,但薄膜内应力也可能增大,导致薄膜开裂,甚至脱落。

6. 基板品质。近升华镀膜工艺要求基板本身具有稳定的尺寸保持性,也就是说,无论是高温还是常温环境下,它的热膨胀系数要尽可能的小,比如玻璃。前置处理的状况如清洁度、表面平整度都会影响薄膜的质量。因为油污、粉尘、指印等表面状况会导致薄膜出现针孔、脱膜、晶界缺陷等质量问题。如果是在已有薄膜的基板上沉积,如 ITO,那么原有薄膜的品质状况也直接决定新沉积的薄膜附着力,这与新的界面是否完整无关,而是指当新的薄膜界面形成后,原有薄膜是否有足够的附着力,这一点是决定新形成的复合膜层对于基板是否足够牢固的重要因素。

4 结束语

本文以磁控溅射、离子蒸发与近空间升华三种主流沉积工艺为核心,结合实践经验,探究了影响薄膜品质的各种工艺条件,明确了不同工艺参数是如何影响薄膜品质,并对如何调试给出了建议性的方向,完成了预设的研究目标。其主要研究结论如下:(1)通过原理分析与实践经验,指出真空度、沉积温度、功率大小以及基板与靶材/蒸发源之间的间距等参数,对薄膜的致密性、附着力等有着重要的影响,为不同场景下如何调节这些参数提供了方向上的引导;(2)无论是磁控溅射、离子蒸发,还是近空间升华,基板前置处理是否彻底,特别是表面质量是否足够好,粉尘、指印、油污等缺陷都会对最终的薄膜品质,特别是针孔、附着力等有着决定性的影响;(3)在生产效率许可的范围内,提高沉积区域的底真空程度对薄膜质量是有益的。薄膜沉积工艺的优化需要持续迭代,不同的镀膜材质以及工艺要求,会有不一样的参数设置范围。此外,具体数值范围也涉及知识产权的问题,所以本文无法提供一种普遍适用的具体参数,但希望本研究成果能够为实际生产过程提供有益参考。

参考文献:

- [1] 宋佳赞,马解放,张亚飞,等.宽幅镀铝聚酯薄膜的物理性能研究[J].包装工程,2025,46(17):335-341.
- [2] 李鑫浦,李永伟,李志强,等.基于PECVD的SiC薄膜制备工艺研究[J].压电与声光,2025,47(03):525-531.
- [3] 李子曦,黄景林,谢春平,等.基于单一气源的PECVD方法制备SiC薄膜及其微观结构研究[J].原子能科学技术,2022,56(07):1473-1482.
- [4] 黄宇鹏.低气压CVD法大面积镀膜均匀性控制的数值研究[D].南昌:南昌大学,2025.
- [5] 上海晶普材料科技有限公司.一种卷绕式真空镀膜机蒸发源保护装置:CN202520202328.5[P].2026-02-24.