氩气气压对磁控溅射镀膜厚度与均匀性的影响

程义卫，黄　煌，薛亚斌，杨　磊，裴子栋
（中国工程物理研究院材料研究所，四川 绵阳 621900）

[摘　要]研究异形工件镀膜均匀性十分重要。为此，采用磁控溅射技术在曲面工件表面制备了铝镀层，通过增重法、台阶仪等手段研究了不同氩气气压（0.3、0.6、0.9、1.2 Pa）条件下的镀层平均厚度及不同位置的厚度均匀性。实验结果表明：镀层厚度受氩气气压的影响较大。在实验条件下，镀层平均厚度与厚度均匀性随着气压的增大均先增大后减小，在0.6 Pa 附近存在最大值；外形面不同位置处的镀层厚度随着气压的增大先增大后减小；内形面不同位置处的镀层厚度随着气压的增大而减小。对该结果通过物理模型进行了仿真验证。仿真与实际均证明了曲面工件上不同位置的沉积速率随气压的变化规律不是一致的。气压对曲面不同位置沉积速率具有差异化影响的主要原因是气压通过调控分子平均自由程和碰撞频率影响沉积行为，而复杂结构工件相较于简单平面基体的边界条件（靶基距、入射角度）一致性更差，因此更难获得均匀性较高的薄膜。研究成果可以为曲面工件磁控溅射镀膜工艺气压的选择提供一定的指导。

[关键词]磁控溅射；曲面工件；氩气气压；镀层厚度；厚度均匀性；物理仿真
[中图分类号] TG174.444　　[文献标识码] A　　doi：10.26935/j.issn.2097-5317.2026.0008
[文章编号] 2097-5317(2026)02-0022-08

The Influence of Ar Pressure on the Film Thickness and Uniformity of Magnetron Sputtering

CHENG Yiwei, HUANG Huang, XUE Yabin, YANG Lei, PEI Zidong
(Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: It is of great significance to investigate the coating uniformity of special-shaped workpieces. In this paper, an aluminum coating was deposited on the surface of curved workpieces by magnetron sputtering technology. The average coating thickness and thickness uniformity at different positions were systematically studied under different argon pressures (0.3, 0.6, 0.9 and 1.2 Pa) via the weight gain method, profilometer and other characterization methods. The experimental results showed that film mean thickness and local thickness were affected obviously by Ar pressure. Under the experimental conditions, film mean thickness and uniformity first increased and then decreased with the increase of Ar pressure. The maximum value was obtained at Ar pressure about 0.6 Pa. Film thickness at different positions of outside surface first increased and then decreased with the in-

收稿日期：2026-03-02
Received：2026-03-02
通信作者：裴子栋（1986-），博士，高级工程师，主要从事金属材料表面改性研究，电话：16659607336，邮箱：nkpzd@163.com
Corresponding Author: PEI Zidong (1986-), Ph.D., Senior Engineer, Research Focus: Surface Modification of Metallic Materials, Tel.: 16659607336, E-mail: nkpzd@163.com.

crease of Ar pressure. Film thickness at different positions of inside surface decreased with the increase of Ar pressure. The results were verified by physical simulation. Both simulation and practice had proved that the deposition rate varied with the Ar pressure at different positions on shell shaped workpieces was not consistent. The main reason for the differential effect of Ar pressure on the deposition rate at different positions on a curved surface was that Ar pressure affected the deposition behavior by regulating the average free path and collision frequency of molecules. Compared to simple planar substrates, complex structured workpieces had poorer consistency in boundary conditions (target substrate distance, incident angle), making it more difficult to obtain thin films with higher uniformity. This paper could provide guidance on the choice of Ar pressure in magnetron sputtering process.

Key words: magnetron sputtering; curved workpiece; Ar pressure; film thickness; uniformity; physical simulation

0 前 言

磁控溅射是一种物理气相沉积技术,因其低温、高效、膜层质量好等诸多优点被广泛应用于工业镀膜中。磁控溅射镀膜质量受多种工艺参量的影响,其中工作气体的压力是很重要的一项,会影响薄膜的沉积速率、形貌、结构,进而影响薄膜的性能。由于溅射过程涉及多物理场问题,复杂程度高,目前没有完整的溅射理论,通常通过实验来确定沉积速率与工艺参数之间的关系。

邢晓帅等[1]采用直流磁控溅射技术在硅衬底上制备钨薄膜,研究了气压对钨薄膜沉积速率、电阻率的影响,结果表明沉积速率随溅射气压的增加先达到峰值,然后下降,薄膜的电阻率随溅射气压的增加而增加。张玉宝等[2]采用反应磁控溅射技术在 Al_2O_3 陶瓷基底上制备了 TaN 薄膜,研究了不同工作气压对薄膜微观结构、粗糙度、沉积速率、膜基结合力、电学性能的影响,发现在工作气压为 0.4 Pa 时,薄膜的膜基结合力和沉积速率最高、导电性和致密度最好。宋鸿佳等[3]采用射频磁控溅射技术分别在玻璃和硅基底上沉积了 Ta_2O_5 薄膜,发现薄膜的沉积速率随着沉积气压的增大而减小,在可见光区薄膜的平均透射率随着沉积气压的增大而增大。黄士勇等[4]用 Monte - Carlo 法模拟磁控溅射的厚度分布,分别计算了靶长、压强和靶基距对膜厚均匀性的影响,并用实际测量结果进行了验证,实验表明压强的变化对膜厚的影响明显,这是由于随着压强的增大,溅射粒子在输运中碰撞的次数增多,从而影响溅射粒子的溅射速率与空间分布。

在通常的薄膜沉积科学研究中,基体多是平片样品,靶材与基体平行放置,因而沉积薄膜的厚度均匀性较好。但在工程应用中,很多异形零件需要镀膜,如头罩、凸轮、模具等。刘怀远[5]在球形工件内表面采用磁控溅射技术制备钛及氮化钛薄膜并研究了靶基距、沉积时间、入射角度、工作气压对薄膜结构及性能均匀性的影响。胡天时等[6]针对高功率脉冲磁控溅射技术在细长管内壁沉积 Cr 膜,探究了工作气压对 Cr 靶的放电等离子体输运特性和管内 Cr 膜沉积的影响规律,并优化沉积工艺参数,显著改善了内壁膜层的均匀性。张健等[7]通过调节直流磁控溅射的气压与温度,优化了异形工件复杂内腔结构镀 Au 膜的膜厚均匀性。顾宏宇[8]针对飞行器光学成像设备上常用的多曲面共体反射镜沉积薄膜均匀性的难点,仿真靶基相对运动,采用高功率脉冲磁控溅射技术寻找最佳的膜层均匀性工艺。异形结构不可避免地导致在工件不同位置发生斜入射沉积,由于“阴影效应”导致工件不同位置膜层厚度、微结构和性能的差异[9,10]。在工件服役过程中,薄膜的薄弱处容易失效、脱落,致使基体遭受破坏。因此研究异形工件镀膜均匀性具有十分重要的意义。为此,本工作针对工业常见的曲面工件,研究了不同氩气气压对磁控溅射镀膜均匀性的影响;为了验证不同气压条件下的成膜机理进行了相应的物理仿真。

1 实 验

1.1 工件及陪衬样准备

曲面工件外直径约 200 mm,内直径约 180 mm,材质为不锈钢。

为了测量曲面工件不同位置处的镀层厚度,将双面抛光(001)晶向的矩形平面小硅片(尺寸约 15 mm×20 mm)作为陪衬样用导电铜胶带粘贴在曲面工件内、外形面不同角度位置(内 0°、内 45°、内 90°、外 0°、外 45°、外 90°),如图 1 所示,胶带粘贴部位对镀膜形成了阻挡。镀膜完毕取下硅片用丙酮去除残余胶带,这样在硅片上胶带覆盖位置与未覆盖位置形成台阶,通过台阶仪进行测量从而获得镀层厚度。使用 Bruker Dektak XT 台阶仪对硅片上的膜层台阶高度进

行测量。每个位置测量 3 个点取平均值,该台阶仪的垂直分辨率优于 0.1 nm,重复性<0.5 nm,以确保厚度数据的可靠性。

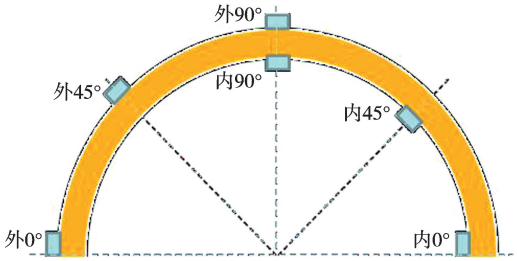


图 1　硅片陪衬样布局示意图
Fig. 1　Silicon samples distributed on the workpiece

1.2　镀膜工艺参数

曲面工件与陪衬样经酒精与丙酮清洗后放入真空室内,铝靶纯度优于 99.9%,靶体布局如图 2 所示,其中上靶靶基距 300 mm;下靶靶基距 100 mm;左靶靶基距 200 mm;右靶靶基距 200 mm。首先进行抽真空,本底真空度优于 5×10^{-4} Pa 后,100 ℃烘烤 30 min,之后进行辉光放电清洗,清洗完毕后进行镀膜。镀膜总时长 30 min,工件加载脉冲偏压为-300 V。采用恒靶电流模式,靶电流设置为:上靶电流 1.5 A;下靶电流 2.5 A;左靶电流 2.0 A;右靶电流 2.0 A。充入高纯氩气,氩气压力分别为 0.3、0.6、0.9、1.2 Pa 进行 4 轮实验。

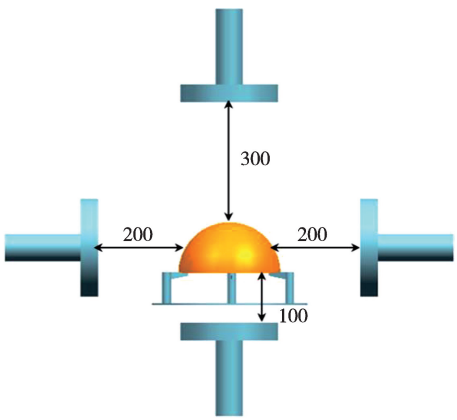


图 2　磁控溅射靶分布示意图
Fig. 2　Sketch of experimental equipment

1.3　镀层平均厚度测试方法

镀层的平均厚度通过增重法进行计算取得,计算公式如下:

$$T=\frac{m_2-m_1+\Delta m}{S\rho} \tag{1}$$

式中,T 为镀层厚度;m_2 是工件镀后质量;m_1 是工件镀前质量;Δm 是辉光放电清洗过程中的质量损失,该损失量可以通过简单的清洗实验得出,主要参数为清洗气压 2.0 Pa、偏压-900 V、清洗时长 30 min,4 轮实验的辉光放电清洗均在此条件下进行;S 是工件镀膜总表面积;ρ 是铝镀层密度。

1.4　镀层厚度均匀性测试方法

镀层的厚度均匀性通过式(2)进行计算

$$H=1-\frac{T_{\max}-T_{\min}}{\bar{T}} \tag{2}$$

式中,H 是厚度均匀性;$T_{\max}$ 是不同角度位置台阶仪测量厚度的最大值;$T_{\min}$ 是不同角度位置台阶仪测量厚度的最小值;$\bar{T}$ 是不同角度位置台阶仪测量厚度的平均值。H 值越接近 1 表明镀层厚度均匀性越好。

2　物理仿真

2.1　模型的建立

磁控溅射镀膜过程中,会在靶面形成类似跑道形的等离子体溅射区域,溅射出的原子或分子主要集中于该区域,如图 3a 所示。图 3b 为磁控溅射靶表面轮廓曲线,根据该曲线可以获得较为精确的溅射位置。由于工件在镀膜过程中是绕竖直轴转动的,在转动的各个方向上靶对工件的贡献是均匀的,因此三维几何模型可以用二维轴对称几何模型代替。

2.2　物理过程

磁控溅射镀膜过程中,在电场作用下,电子获得能量与氩原子碰撞,若电子能量足够会让氩原子电离出氩离子和新电子。在电场作用下,新电子飞向基片,氩离子飞向靶,并以高能量轰击靶表面,使靶发生溅射。在溅射粒子中,中性的靶原子或分子沉积在基片上形成薄膜。主要考虑如下模型:

电子密度方程:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t}+\nabla\cdot\Gamma_e=R_e-(u\cdot\nabla)n_e \tag{3}$$

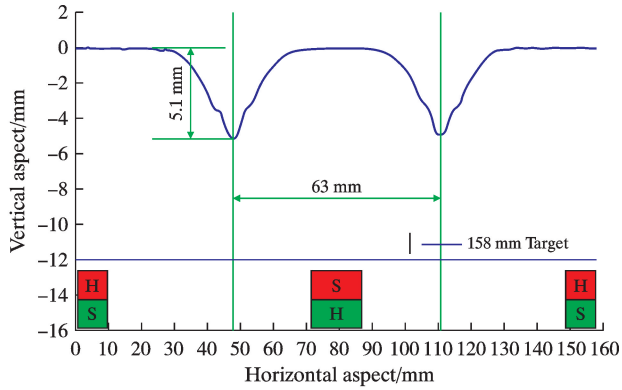
其中,n_e 是电子密度;t 是时间;Γ_e 是电子密度通量;R_e 是电离率;u 是气体速度,考虑为 0。

$$\Gamma_e=-\mu_e\cdot En_e-D_e\cdot\nabla n_e \tag{4}$$

其中,μ_e 是电子迁移率;E 是电场;n_e 是电子密度;D_e 是电子扩散系数。



（a）



（b）磁控溅射靶表面轮廓曲线

图 3　磁控溅射靶溅射区域图

Fig. 3　Magnetron sputtering target

电子能量密度方程：

$$\frac{\partial n_\varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{\Gamma}_\varepsilon + E \cdot \boldsymbol{\Gamma}_e = S_{en} - (u \cdot \nabla) n_\varepsilon \quad (5)$$

其中，n_ε 是电子能量密度；$\boldsymbol{\Gamma}_\varepsilon$ 是电子能量密度通量；S_{en} 是电子能量产生率。

$$\boldsymbol{\Gamma}_\varepsilon = -\mu_\varepsilon \cdot E n_\varepsilon - D_\varepsilon \cdot \nabla n_\varepsilon \quad (6)$$

其中，μ_ε 是电子能量的迁移率；D_ε 是电子能量的扩散系数。

静电场方程：

$$\nabla \cdot D = \rho_e \quad (7)$$

其中，D 是极化矢量；ρ_e 是电荷密度。

电场：

$$E = -\nabla V \quad (8)$$

其中，E 是电场强度；V 是电势。

离子密度演化方程：

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot j + R_j \quad (9)$$

其中，ρ 是氩粒子密度；w 是离子浓度；j 是离子流密度；R_j 是电离率。

离子漂移速度：

$$V_d = D_{j,m} \nabla \ln(w) - z_j u_m E \quad (10)$$

其中，V_d 是离子漂移速度；$D_{j,m}$ 是离子的扩散系数；z_j 是离子电荷；u_m 是离子的迁移率。

边界电子密度通量：

$$n \cdot \boldsymbol{\Gamma}_e = \frac{1 - r_e}{1 + r_e}\left(\frac{1}{2} v_{e,th} n_e + n_e \mu_e \cdot E \cdot n\right) \quad (11)$$

其中，n 是壁的法向矢量；r_e 是电子在壁上的反射系数；$v_{e,th}$ 是电子的热速度。

边界电子能量密度通量：

$$n \cdot \boldsymbol{\Gamma}_\varepsilon = \frac{1 - r_e}{1 + r_e}\left(\frac{5}{6} v_{e,th} n_e + n_e \mu_\varepsilon \cdot E \cdot n\right) \quad (12)$$

粒子运动方程：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(m_p v) = F \quad (13)$$

其中，m_p 是粒子质量；v 是粒子速度；F 是粒子总受力。

发射粒子的速度分布：

$$\begin{cases} v_x = c\sin\theta\cos\varphi \\ v_y = c\sin\theta\sin\varphi \\ v_z = c\cos\varphi \end{cases} \quad (14)$$

其中，φ 是方位角；θ 是极角。

粒子碰撞概率模型：

$$\nu_j(t) = n\int \sigma_j(|v - v_g|)\,|v - v_g| f(v_g)\,\mathrm{d}v_g \quad (15)$$

其中，n 是气体数密度；v 是粒子速度；v_g 是单个原子或分子的速度，考虑为 0。

弹性碰撞模型：

$$v' = v - \frac{m_g}{m_p + m_g}(g - g') \quad (16)$$

其中，m_g 是氩原子质量；m_p 粒子质量；g 是相对速度，$g = v - v_g$；g' 是碰撞后的相对速度，$g' = |g|R$，R 是随机单位矢量。

在上述模型中，采用有限元方法求解等离子体场相关的方程，可以获得在特定工艺参数下的等离子体环境参数，包括真空室内、靶面附近的等离子体密度等信息。在此基础上，使用粒子方法模拟靶面上的靶原子发射、与背景气体的碰撞、空间输运等过程，并获得基片表面沉积的靶原子的通量，由此可以计算沉积膜层的厚度。

在这个过程中，一方面，靶面上的原子溅射速率与靶面附近的等离子体密度呈正比；另一方面，靶原子在空间中的输运过程中与背景气体的碰撞概率与

真空室内的气压呈正比。

使用上述模型,在不同的工艺参数下,获得了基片上的膜层的厚度分布。

3 结果与讨论

3.1 镀层平均厚度

不同氩气气压镀膜的镀层平均厚度结果列于表1中,图4是不同氩气气压对应的镀层平均厚度曲线。从图中可以看出镀层平均厚度随着氩气气压的变大呈现出先增大后减小的变化趋势,这说明存在最佳气压对应最大的镀膜速率。由表中数据可以看出当氩气气压在0.6 Pa附近时镀层平均厚度取得最大值,约为5.29 μm。

表1 不同氩气气压镀膜的平均厚度

Table 1 Film mean thickness under different Ar pressure

压力/Pa	0.3	0.6	0.9	1.2
平均厚度/ μm	5.03	5.29	4.23	4.23

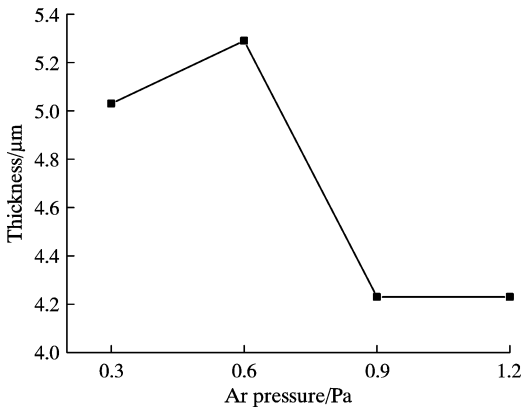


图4 氩气气压与镀层平均厚度关系曲线

Fig. 4 Curve of film mean thickness dependent on Ar pressure

3.2 镀层厚度均匀性

表2是不同氩气气压时镀膜后陪衬样的台阶仪数据。

表2 不同氩气气压镀膜厚度分布 μm

Table 2 Film thickness at variant positions under different Ar pressure μm

位置	气压/Pa			
	0.3	0.6	0.9	1.2
内 90°	5.005	3.403	2.649	1.630
内 45°	6.873	4.741	3.401	2.603
内 0°	8.155	6.248	5.480	4.360
外 90°	3.896	4.565	4.204	3.879
外 45°	3.571	4.345	4.400	3.071
外 0°	4.246	4.499	3.997	2.983

图5是不同氩气气压下镀层厚度与位置关系曲线图。内形面的厚度分布按照90°→45°→0°逐渐变大,这主要受下靶与内形面不同位置的距离影响,距离越近,镀层厚度越厚。外形面的厚度受靶基距与靶电流的共同影响,没有明显规律。图6是通过式(2)计算得到的厚度均匀性与氩气气压关系曲线,在氩气0.6 Pa时曲面工件厚度均匀性最佳。

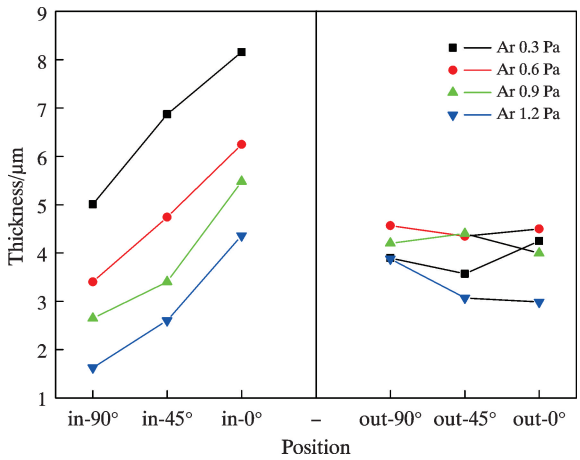


图5 不同氩气气压下镀层厚度与位置关系曲线

Fig. 5 Curve of film thickness dependent on positions under different Ar pressure

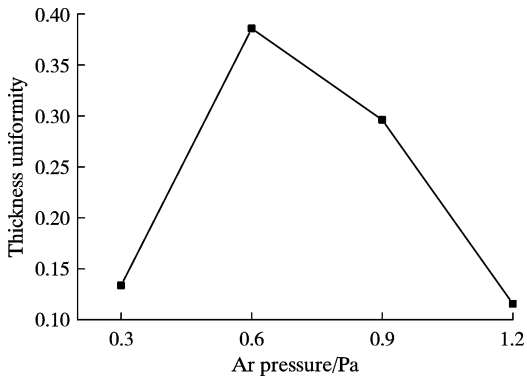


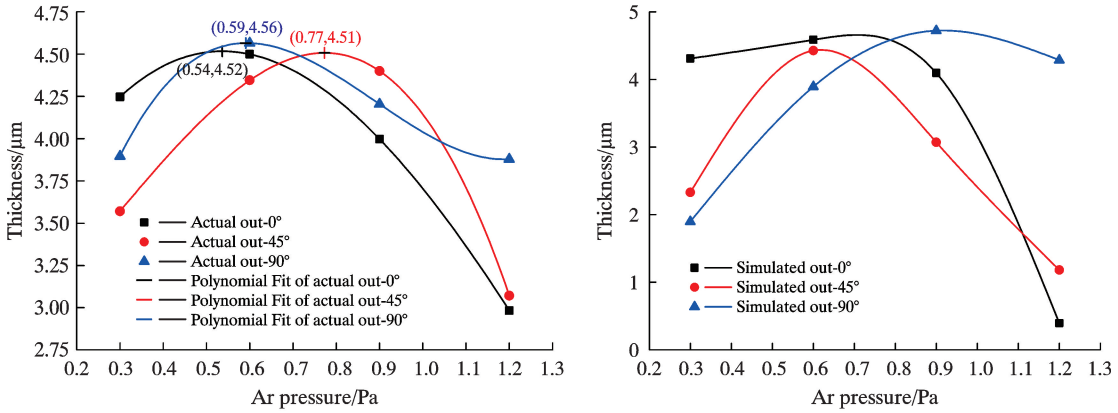
图6 氩气气压与厚度均匀性关系曲线

Fig. 6 Curve of film thickness uniformity dependent on Ar pressure

3.3 外形面不同位置处镀层厚度与氩气气压关系

图7是外形面不同位置处镀层厚度与氩气气压关系曲线图,图7a为实测值与三阶多项式拟合图;图7b为有限元分析仿真结果。随着氩气气压的增大镀层厚度均表现出先增大后减小的趋势,为了获得镀层厚度取得最大值时对应的氩气气压,对数据进行了三阶多项式拟合,结果如下:外0°位置在0.54 Pa时取得最大厚度4.52 μm;外45°位置在0.77 Pa时取得最大厚度4.51 μm;外90°位置在0.59 Pa时取得最大厚

度 4.56 μm。不同位置在不同气压下的结果与靶状态(靶基距、靶电流)相关。



(a)实测与拟合结果　　(b)仿真结果

图 7　外形面不同位置处镀层厚度与氩气气压关系曲线

Fig. 7　Curve of film thicknessat different positions of outside surface dependent on Ar pressure

由气体分子运动论可知,气体分子平均自由程与压强有如下关系[11]:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 P} \tag{17}$$

其中,λ 是气体分子的平均自由程;k 是波尔兹曼常数;T 是气体温度;σ 是气体分子直径;P 是压强。由上式可以得知,在保持气体温度与气体种类不变时,气体分子的平均自由程随压强的增大而减小,溅射原子与气体分子的相互碰撞次数随之增加,二次电子发射随之增强。

由气体放电理论可知[12],电流密度 j 与汤生第三电离系数 γ 和阴极位降区厚度 d 的关系如下式描述:

$$j = \frac{4\varepsilon_0\mu_i V^2}{d^3}(1+\gamma) \tag{18}$$

其中,ε_0 是真空中的介电常数;μ_i 是离子的迁移率;V 是阴极位降。从上述分析可知,压强增大时,二次电子发射会增强,那么 γ 就增大,同时 d 将随之减小,由式(18)可知,电流密度将增大,因此沉积速率会增大。

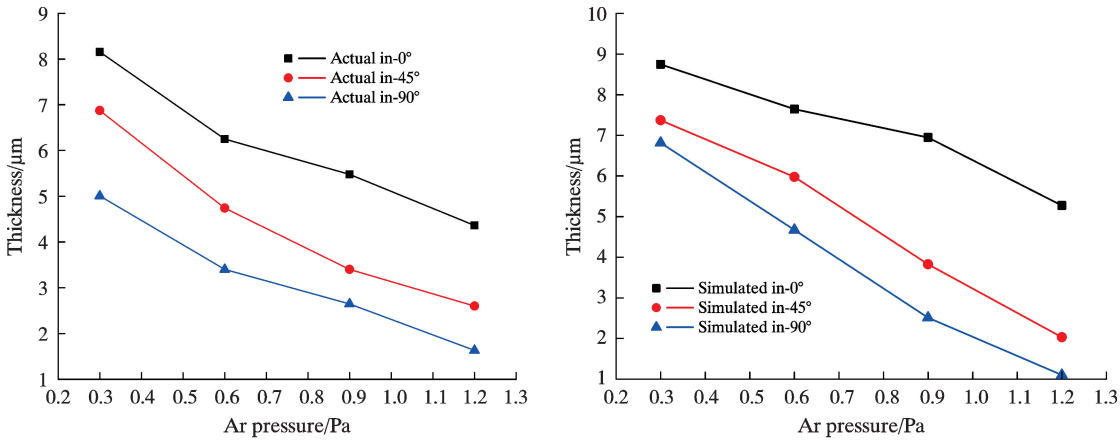
工作气压过大时,沉积速率会减小,其原因如下:(1)由于气体分子的平均自由程变小,溅射原子的背反射和受气体分子散射的几率增大,并且该影响超过了放电增强的影响。经多次碰撞后部分溅射原子会脱离沉积区域,而导致沉积速率降低。(2)随着单位体积内氩气分子的增多,溅射原子与其碰撞次数将大量增加,导致溅射原子的能量在碰撞过程中损失很多,使得粒子抵达基片的数目减少,沉积速率下降。

因此,随着氩气气压逐渐增大,外形面不同位置处镀层厚度均表现出先增大后减小的趋势。

下面分析曲面工件外形面不同位置最大镀层厚度对应的“最佳气压”偏差的可能原因。对于曲面工件的外形面,不同位置相对于各个靶源的入射角度不同。在外 45°这样的倾斜位置相较于正对靶源的位置(外 0°、外 90°),溅射粒子的飞行路径更长,与背景气体碰撞的几率更大。当气压升高时,碰撞加剧,对于倾斜入射的位置,粒子可能经历更复杂的散射过程。可能存在一个“竞争机制”:在较低气压(如 0.3~0.6 Pa),放电增强(电流密度增大)带来的正面效应主导,所有位置沉积速率增加;当气压继续升高,碰撞散射导致的粒子能量损失和路径偏转效应开始凸显,且这种效应对不同入射角度的敏感度不同。对于外 45°位置,其“最佳气压窗口”可能因其特殊的几何位置,且同时受到上左右三靶共同作用而右移(即需要更高的气压来平衡因角度带来的额外散射损失),从而导致图 7a 中其厚度峰值出现在比外 0°和外 90°更高的气压下。

3.4　内形面不同位置处镀层厚度与氩气气压关系

图 8 是内形面不同位置处镀层厚度与氩气气压关系曲线图,图 8a 为实测值;图 8b 为有限元分析仿真结果。随着氩气气压逐渐增大镀层厚度均表现出减小的趋势。曲面内形面作为一个半封闭的空间,在实验气压范围内,更容易发生如下现象:随着氩气气压增大,气体分子的平均自由程减小,碰撞频率增大,而导致溅射原子的能量损失、反射和散射几率变大,这些均会降低沉积速率。



（a）实测结果　　（b）仿真结果

图 8　内形面不同位置处镀层厚度与氩气气压关系曲线

Fig. 8　Curve of film thicknessat different positions of inside surface dependent on Ar pressure

物理仿真结果(图 7b,8b)与实验测量值(图 7a,8a)的变化趋势基本一致。各位置均有一定的偏差,以 0.6 Pa 时外 0°位置为例,仿真预测厚度为 4.48 μm,实验值为 4.50 μm,相对偏差小于 0.5%。对于内形面,仿真整体上略微高估了沉积厚度,在 0.3 Pa 时内 0°位置的相对偏差约为 5%。这种偏差可能源于仿真模型中对靶面刻蚀区域形貌简化、忽略了溅射过程中靶面状态(如粗糙度变化)对溅射产额和粒子角分布的影响,以及将三维旋转工件简化为二维轴对称模型所带来的近似。尽管如此,仿真成功复现了内外形面沉积行为对气压响应的差异,验证了理论分析。

4　结　论

本研究系统考察了氩气工作气压(0.3, 0.6, 0.9, 1.2 Pa)对不锈钢曲面工件磁控溅射镀铝工艺的影响。实验结果表明:镀层的平均厚度与整体均匀性均随气压升高呈现先增后减的趋势,并在 0.6 Pa 附近达到最佳值。

研究进一步揭示了曲面几何带来的复杂影响:工件外形面各处的镀层厚度随气压变化呈先增后减;而内形面的厚度则随气压升高单调下降。这种差异源于气压通过调控溅射粒子的平均自由程和碰撞频率,同时产生“放电增强”(提升沉积速率)与“碰撞散射”(降低沉积速率)2 种竞争效应。对于开放的外形面,两种效应竞争形成峰值;对于半封闭的内形面,散射损失始终占主导。物理仿真的结果与实验趋势基本吻合,验证了理论分析的可靠性。

该工作明确指出,对于异形结构工件,由于其表面各点靶基距与粒子入射角等边界条件不一致,导致对同一工艺参数(如气压)的响应不同,这是实现均匀镀膜的主要挑战。本研究明确了特定工艺下优化气压的量化区间(~0.6 Pa)和深入的理论机理解释。

[参 考 文 献]

[1] 邢晓帅,刘影夏,于晓东,等.溅射功率和气压对直流磁控溅射制备钨薄膜的影响[J].稀有金属材料与工程,2022,51(2):682-688.
XING X S, LIU Y X, YU X D, et al. Influence of Sputtering Power and Gas Pressure on the Preparation of Tungsten Films by DC Magnetron Sputtering[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(2): 682-688.

[2] 张玉宝,李志刚,王　艺,等.工作气压对磁控溅射 TaN 薄膜微结构和性能的影响[J].材料导报,2021,35(增刊 2):60-63.
ZHANG Y B, LI Z G, WANG Y, et al. Effect of Work Pressure on Microstructure and Properties of Magnetron Sputtering TaN Coatings[J]. Materials Reports, 2021, 35(S2): 60-63.

[3] 宋鸿佳,郭　蓉,郭云鹏,等.沉积气压对磁控溅射 Ta_2O_5 薄膜光学性能的影响[J].真空,2018,55(3):26-29.
SONG H J, GUO R, GUO Y P, et al. Influence of deposition pressure on optical properties of Ta_2O_5 thin films by magnetron sputtering[J]. Vacuum, 2018, 55(3): 26-29.

[4] 黄士勇,曲风钦,苗　晔,等.用 Monte-Carlo 法模拟大型磁控溅射器的膜厚分布[J].真空电子技术,1999(5):38-42.
HUANG S Y, QU F Q, MIAO Y, et al. Monte Carlo Simulation of The Distribution of thin Film Thickness of Large

Size Magnetron Sputtering Device[J]. Vacuum Electronics, 1999(5): 38-42.

[5] 刘怀远.球形工件内表面磁控溅射技术制备钛及氮化钛薄膜均匀性研究[D].成都:西南交通大学,2020.
LIU H Y. The Uniformity of Titanium and Titanium Nitride Films Deposited on the Inner Surface of the Hemispherical Workpiece by Magnetron Sputtering[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.

[6] 胡天时,田修波,巩春志,等.工作气压对管内 HiPIMS 等离子体输运行为和 Cr 涂层性能的影响[J].中国表面工程,2025,38(2):27-35.
HU T S, TIAN X B, GONG C Z, et al. Effect of Working Pressure on the Performance of HiPIMS Plasma Transport and Cr Coating in the Tube[J]. China Surface Engineering, 2025, 38(2): 27-35.

[7] 张 健,李建浩,齐振华,等.直流磁控溅射对异形工件内表面沉积薄膜性能的影响[J].真空科学与技术学报,2022,42(3):223-227.
ZHANG J, LI J H, QI Z H, et al. Effect of DC Magnetron Sputtering on the Properties of Thin Films Deposited on the Surface of Shaped Workpieces[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2022, 42(3): 223-227.

[8] 顾宏宇.基于高能脉冲磁控溅射的曲面共体光学元件镀膜工艺研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
GU H Y. Study on Coating Technology of Curved Common-Body Optical Elements Based on High Energy Pulse Magnetron Sputtering[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.

[9] HAWKEYE M M, TASCHUK M T, BRETT M J. Glancing Angle Deposition of Thin Films: Engineering the Nanoscale[M]. Chichester: Wiley, 2014.

[10] 江 帆.高功率脉冲磁控溅射斜入射沉积氮化钛薄膜结构及应力调控研究[D].成都:西南交通大学,2016.
JIANG F. Structure and Stress Modulation of Titanium Nitride Films Deposited with Inclination Angle by High Power Pulsed Magnetron Sputtering (HPPMS)[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

[11] 宁兆元,江美福,辛 煜,等.固体薄膜材料与制备技术[M].北京:科学出版社,2008:10-11.
NING Z Y, JIANG M F, XIN Y, et al. Thin Solid Film Materials and Preparation Technology[M]. Beijing: Science Press, 2008: 10-11.

[12] 王 璘,余欧明,杭凌侠,等.磁控溅射镀膜中工作气压对沉积速率的影响[J].真空,2004,41(1):9-12.
WANG L, YU O M, HANG L X, et al. Influence of the working gas pressure on the deposition rate in magnetron sputtering for thin coating[J]. Vacuum, 2004, 41(1): 9-12.

[编校:魏兆军]