

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.03.009

沉积工艺对纳米 Au 薄膜内应力和微观结构的影响

纪建超*, 颜悦, 哈恩华

(北京航空材料研究院股份有限公司, 北京 100095)

摘要: 针对薄膜应力等原因造成的电子器件或光学器件失效, 探索了沉积工艺与 Au 薄膜的显微结构和内应力的关系, 目的在于通过工艺优化, 提高薄膜质量并延长器件的使用寿命。采用直流脉冲磁控溅射方法沉积了 Au 薄膜, 借助 X 射线衍射(XRD)仪、探针式表面轮廓分析仪、原子力显微镜(AFM)、分光光度计等表征手段, 分析了薄膜的结晶性能、内应力、显微结构和光学性能; 研究了沉积功率等参数对 Au 薄膜的结构、力学性能、光学性能的影响。结果表明, 所沉积的 Au 薄膜为(111)晶面择优生长的织构结构。随沉积功率的增加, Au 薄膜生长速率接近于线性增加; 薄膜为柱状晶结构, 且随沉积功率增加, Au 薄膜的结晶能力衰减, 晶粒尺寸递减; 薄膜表面粗糙度 R_a 随薄膜沉积功率出现先降低后升高的趋势; 随沉积功率增加, 沉积的 Au 薄膜可见光透过率呈下降趋势, 然后趋于稳定; 所沉积的 Au 薄膜表现为张应力, 随沉积功率的增加, 薄膜的内应力变大。分析研究结果可知, 沉积功率 1 kW 为最优工艺。

关键词: Au 薄膜; 磁控溅射; 内应力; 显微结构; 光学性能

中图分类号: TQ34 **文献标识码:** A

Effect of deposition process on internal stress and microstructure of Au nanometer films

Ji Jianchao*, Yan Yue, Ha Enhua

(Beijing Institute of Aviation Materials Co., Ltd., Beijing 100095, China)

Abstract: In view of the failure of electronic or optical devices caused by thin film stress, the relationship between the deposition process and the microstructure and internal stress of Au thin films was explored in order to improve the quality of thin films and prolong the service life of devices through process optimization. The method of DC pulse magnetron sputtering was used to deposit Au film. The crystallization properties, internal stress, microstructure and optical properties of the film were analyzed by means of X-ray diffraction (XRD) probe surface profile analyzer, atomic force microscope (AFM), spectrophotometer and other characterization methods. The effect of deposition power and other parameters on the structure, mechanical properties and optical properties of Au film was studied. The results show that the deposited Au film has a texture structure of optimal growth on (111) crystal plane, and the growth rate of Au film increases linearly with the increase of deposition power. The film is

收稿日期: 2024-10-21 修回日期: 2024-11-04

通信作者: 纪建超(1972—), 硕士, 高级工程师, 研究方向为航空透明材料及功能薄膜等, email: ji_jianchao@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51802297)

引用信息: 纪建超, 颜悦, 哈恩华. 沉积工艺对纳米 Au 薄膜内应力和微观结构的影响[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(3): 60-66.

Ji Jianchao, Yan Yue, Ha Enhua. Effect of deposition process on internal stress and microstructure of Au nanometer films[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(3): 60-66.

columnar crystal structure, the crystallization capacity of Au film attenuates and the grain size decreases with the increase of deposition power. The surface roughness R_a of the film decreases first and then increases with the deposition power. With the increase of deposition power, the visible light transmittance of the deposited Au films decreases and then becomes stable. The deposited Au films showed tensile stress, and the internal stress of the films increase with the increase of deposition power. The research results indicate that the deposition power of 1 kW is the best process.

Keywords: Au film; magnetron sputtering; internal stress; microstructure; optical properties

在众多金属导电膜材料中, Au具有抗腐蚀、不易氧化、延展性好等特性, 在一些特定的领域仍然是最优选择。Au导电膜作为一种经典的薄膜在电磁屏蔽光电薄膜、集成电路、专用电极、生物传感器等领域广泛应用^[1-8]。但Au薄膜也具有价格昂贵、颜色深、易于出现应力缺陷等缺点。因此需要从膜层结构出发, 优化其工艺, 制备高透光、低应力的薄膜。

在单独使用时, Au薄膜的可见光透过率并不突出, 但是在与介质增透膜匹配使用时, 可以得到较好的光学性能^[9-10]; 同时, 由于在Au薄膜波长小于500 nm的区域会产生强烈的吸收, 因而使其反射率减低, 所以其在可见区的反射率只有40%~50%, 在长波端其反射率逐渐上升, 在800 nm时反射率可以达到96%, 而在波长2 μm 时其反射率可到达99%, 这种特殊性能在电子器件中有所应用^[11-12]。Au薄膜的电性能、光学性能、力学性能和其结晶性、晶体的生长方式密切相关, 而薄膜的结晶性能又是由沉积薄膜的各种工艺参数所决定。许小亮等^[8]研究了厚度、气压、温度、功率等参数对Au薄膜结晶性能的影响, 研究表明所沉积的Au薄膜具有明显(111)择优取向, 衬底温度, 薄膜厚度, 功率, 工作气压是影响晶粒尺度的因素; Qiu等^[13]研究了SiO₂/Si的(100)和云母基片沉积的Au薄膜的特性, 研究表明, 在SiO₂/Si的(100)衬底上生长的薄膜表现为(111)晶面的择优生长, 而在云母衬底上则表现为(111)和其他晶面混合结晶取向; Semaltianos等^[14]使用蒸发镀的方法分别在玻璃、云母、CaF₂、和Si基底上沉积了金膜, 利用STM研究和对比了不同基底薄膜的表面形貌, 研究了基片预烘烤温度及时间对薄膜的粗糙度和晶粒平均面积的影响, 讨论了常温和加热模式下不同基底上薄膜的外延生长模式。

对于金属膜和介质膜应力的研究是目前的一个新的方向, 这是由于内应力是造成薄膜失效的主要原因之一。Parvizian等^[15]采用射频溅射的方法, 在p-GaAs和SiO₂衬底上沉积了Pt金属膜, 研究了沉积功率对不同衬底的Pt薄膜的残余应力和形貌的影

响, 研究表明, 在GaAs衬底上, 沉积功率为200 kW时, Pt膜的应力最小; 当沉积功率从200 kW增加到250 kW时, 在SiO₂衬底上沉积的Pt膜, 其残余应力由张应力转换为压应力。H. M. Choi等^[16]使用偏置溅射法沉积了Cu薄膜, 研究了Cu薄膜密度与薄膜残余应力的关系, 结果表明薄膜的拉伸应力随薄膜密度的增大而减小。Asa'ad等^[17]采用直流磁控溅射法在不同气体分压、不同功率、不同退火温度的条件下在Si衬底上沉积了金属钨薄膜, 并采用曲率测量法评估了沉积条件对薄膜残余应力的影响, 结果表明随溅射气压增加, 薄膜的残余应力由压应力转化为拉应力, 然后再转化为压应力; 300 °C退火后, 低气压的薄膜显著的存在从压应力转变为拉应力。刘明智等^[18]以石英材料为基片, 采用磁控溅射方法沉积了金膜, 采用基片曲率方法测定薄膜内应力, 研究了沉积气压和沉积温度等参数对金膜膜层内应力与微观形貌的影响, 分析表明:磁控溅射镀金膜膜层内应力表现为拉应力, 膜层内应力的大小随镀膜温度的升高而升高; 在一定溅射气压范围内, 膜层内应力随溅射气压的升高而降低; 低温处理对膜层的内应力没有影响, 高温热处理会导膜层的内应力增大。

本文采用脉冲磁控溅射方法在单晶硅上沉积了Au薄膜, 讨论了沉积功率、沉积电压等工艺参数对薄膜结晶性能, 微观结构和薄膜内应力的影响, 目的是对Au薄膜的工艺稳定和结构优化提供参考思路。

1 实验

1.1 基体材料

基体材料为直径50.8 mm, 厚度1 mm的单晶硅片和尺寸为50 mm×50 mm×3 mm的YB-3有机玻璃。基体材料在镀膜前, 分别用去离子水和乙醇进行超声清洗, 并在室温晾置24 h后备用。

1.2 制备样品

实验采用兰州真空设备有限责任公司生产的

JTD-1400磁控溅射镀膜机进行镀膜工艺的研究。采用纯度为99.99%的Ar气为工作气体,靶材为99.99%的Au靶和99.99%的掺锡氧化铟(Indium Tin Oxide, 简称为ITO)靶。为获得高质量薄膜,制备过程中先在硅片和玻璃上沉积一层厚度为20 nm的ITO薄膜,然后再沉积Au薄膜。实验研究中,在测试光学性能时使用玻璃基片,测试其他性能时则采用硅片作为基片。镀Au薄膜时,设置靶基距为100 mm,本底真空为0.003 Pa,工作真空为0.3 Pa。研究沉积功率和沉积电压的影响时,设置膜厚为20 nm,沉积功率选择1、2、3、4和5 kW。

1.3 薄膜性能表征和形貌观察

采用布鲁克公司Dimension EDGE原子力显微镜观察薄膜的表面形貌,仪器设置为轻敲模式,扫描区域选定为1 μm×1 μm。

使用布鲁克公司的Advance达芬奇XRD分析仪测试薄膜的结晶状态。测试方法如下:设备采用Cu靶K_α射线(波长λ=0.154 18 nm),设定工作电压为40 kV,工作电流为10 mA,设定步长为1 s。

使用KLA Tencor P-7探针式表面轮廓分析仪测试薄膜厚度和基片曲率半径,使用螺旋测微器测定基片厚度,采用基片曲率法得到薄膜应力。基底曲率法主要基于Stoney公式计算应力,其表达式为:

$$\sigma = \frac{E d_1^2}{6 d_2 (1 - \nu)} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (1)$$

式中: E为基片的杨氏模量; ν为基片的泊松比; d₁、d₂分别为基片和薄膜的厚度; r₁、r₂分别为镀膜前和镀膜后基片的曲率半径。

2 结果与讨论

2.1 沉积功率对金膜结构的影响

2.1.1 沉积功率对 Au 薄膜沉积速率的影响

由图1可知,随着沉积功率的增加,金膜的生长速率也在增加,但二者的关系不是严格线性的,表现为随沉积功率的增加,生长速率的增速变缓。这是由于在沉积Au薄膜时,工作真空不变,因此真空室内的氩气量维持不变。在低功率时,有部分氩气未被电离,或由于氩离子能量较小,其轰击的金原子未能到达基片沉积为Au薄膜;当功率增加时,电离的氩离子数量增加,更多的氩离子轰击Au靶,到达基片的Au原子增加,生长速率相应增加。然而,沉积功率的增加表现为沉积电压和沉积电流均在增加,即粒子的能量和数量都在增加,但粒子数量

未能随功率增加而线性增加,而是低于功率的增加速率。

2.1.2 沉积功率对 Au 薄膜的结晶性能的影响

图2是不同功率沉积的Au薄膜的XRD图,图中信息表明在不同功率沉积的Au薄膜均为多晶结构。对比Au薄膜的特征峰可以看出,所沉积的Au薄膜均有且只有(111)晶面的特征峰,这说明薄膜为在(111)晶面择优生长的织构结构。由于特征峰的高度随沉积功率的增加而增加,说明沉积功率的增加促进了Au薄膜的晶体结构的形成。Hong Qiu等^[13]的研究认为,在SiO₂/Si的(100)晶面生长的Au薄膜具有(111)取向,在薄膜生长的初始阶段,金簇或金岛以(111)取向生长,具有相同取向的簇或岛在沉积中相互结合,很容易形成大颗粒,少数非常大的颗粒可以认为是(111)取向晶粒的二次晶粒生长,研究还表明,在SiO₂/Si的(100)生长的Au薄膜相较于云母等其他基材,所生长的Au薄膜晶粒具有较宽的晶粒尺寸分布。Adamik等^[19]的研究也表明,具有面心结构的金属薄膜,其晶粒的表面自由能在(111)晶面择优取向时到达最小,因此,所沉积的Au薄膜具有(111)择优取向。

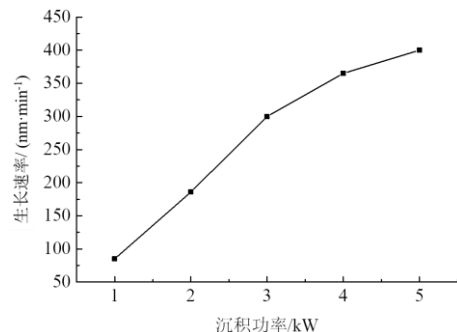


图1 不同沉积功率下 Au 薄膜的生长速率

Fig.1 Growth rate of Au film at different deposition power

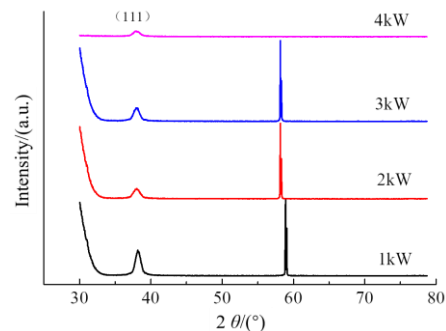


图2 不同功率沉积的 Au 薄膜的 XRD 图

Fig.2 XRD patterns of Au film at different deposition power

依据XRD图谱峰值宽度和高度并结合Scherrer公式,可以计算所沉积的Au薄膜的晶粒尺寸,见表1。Scherrer公式的具体表达式为:

$$D = K \lambda / (\beta \cos \theta) \quad (2)$$

式中: D 为晶粒尺寸; K 为Scherrer常数,取值0.9; λ 为X射线的波长,取值0.154 18 nm; θ 为衍射角,取值38.12°。

表1和图4给出了通过Scherrer公式计算的晶粒尺寸,可以看出Au薄膜的晶粒尺寸随沉积功率的增加而变小。这是由于在较低的沉积功率下,Au原子在基片上有足够的迁移时间,易于形成较大的晶粒;而在功率逐渐增加时,Au原子在基片的迁移时间较短,同时空隙、位错等缺陷增加,进而促使较小晶粒的形成。表1和图5给出了所沉积薄膜的表面粗糙度,其中晶粒尺寸由Scherrer公式计算而来,Au薄膜表面的粗糙度 R_a 由原子力显微镜的探针测出。测试结果表明,薄膜的粗糙度先降后升,这可能是由于当沉积功率较小时,薄膜形成的晶粒直径较大,薄膜表面的粗糙度较大;功率升高时,晶粒尺寸变小,薄膜趋于平坦且粗糙度降低;功率再次增加时,薄膜的空隙、位错等缺陷增加,粗糙度也进一步上升。

表1 不同沉积功率下 Au 薄膜的晶粒尺寸

Tab.1 Grain size of Au thin film with different depositing power

序号	功率/kW	半高宽/(°)	晶粒尺寸/nm	R_a /nm
1	1	0.88	9.56	0.23
2	2	1.17	7.13	0.23
3	3	1.15	7.38	0.18
4	4	1.35	6.23	0.26

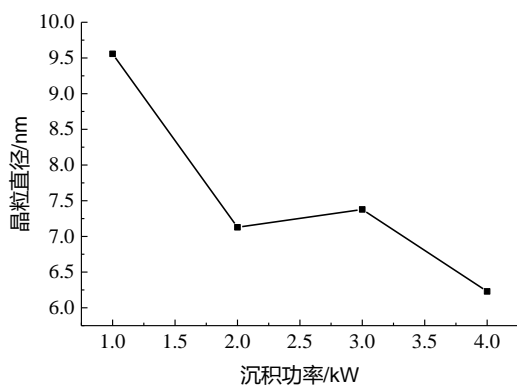


图3 不同功率沉积的 Au 薄膜的晶粒直径

Fig.3 Grain diameter of Au film at different deposition power

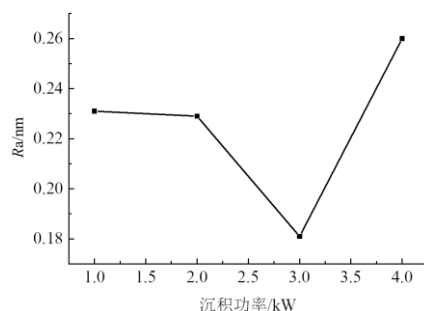


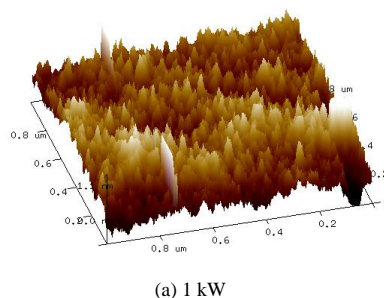
图4 不同功率沉积 Au 薄膜的表面粗糙度

Fig.4 Surface roughness of Au film at different deposition power

2.1.3 不同沉积功率下 Au 薄膜的微观结构

根据薄膜生长理论^[20-21],磁控溅射或蒸发镀膜过程中薄膜的沉积速率一般较快,原子很难有足够的时间扩散到能量低的平衡位置上,快速的沉积方式促使薄膜形成多个晶核进行生长,因此薄膜出现动力学糙化现象,即大多数表现为三维岛状生长而非二维生长模式。同时,快速的沉积模式使得晶粒一般为多晶生长,即使使用单晶基片或衬底,也达不到取向一致的晶核,最后形成多晶体或织构。许小亮等的研究也认为,薄膜生长分3个阶段,即晶粒成核、正常晶粒生长和反常晶粒生长。从这个角度来看,薄膜的择优取向和织构,都是在反常晶粒生长过程中形成的。

从图5的AFM图也可以观察到,薄膜在结束基片上的岛状生长后,以柱状晶的形态继续生长。随功率的增加,Au薄膜的结晶形态没有明显变化,仅仅是晶粒尺寸有所不同。由于在低功率时晶粒的生长比较充分,因此形成了较大的晶粒尺寸;然而,结合表1和图5的结果来看,薄膜表面的粗糙度也有所区别,但未表现出明显的规律。Qiu等^[13]的研究表明,由于在硅或氧化硅的基底上,Au薄膜的岛或簇的生长以(111)取向为主,而生成的(200)或(220)等晶面比较少。因此,由于晶粒取向统一,薄膜容易产生晶粒合并现象而形成大晶粒,这和本研究的结果也是一致的。



(a) 1 kW

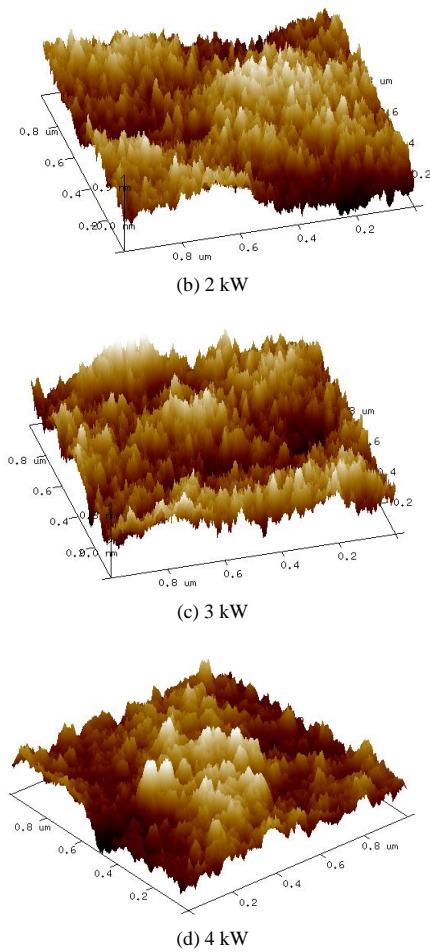


图5 不同功率沉积 Au 薄膜的 AFM 图

Fig.5 AFM patterns of Au film at different deposition power

2.2 沉积功率对薄膜光学性能的影响

2.2.1 沉积功率对金膜折射率的影响

薄膜的折射率一般低于其块状材料。较薄的薄膜通常具有低折射率，而薄膜越厚，其折射率越接近其块状材料；同时，薄膜的折射率还取决于薄膜的沉积方式和沉积工艺。一种材料的折射率是由它的价电子在电场作用下的性质决定的，且对于介质材料，介电常数 ϵ 计算见式(3):

$$\epsilon = n^2 \tag{3}$$

式中： n 为材料的折射率。

由于Au薄膜的光学性能与薄膜的折射率相关，因此研究其折射率与工艺的关系就十分必要。可以看出Au薄膜折射率先升后降，在沉积功率3 kW左右到达最高点。形成这种趋势是由于，在沉积功率较低时，Au原子的能量较低，在基底表面的迁移能量也较低，薄膜具有较低的填充密度；当功率较高时，沉积速率较大，使得Au原子来不及完成在基片表面

的迁徙即沉积成膜，此时Au薄膜表现为较多的孔隙率，从而也使得薄膜的堆积密度降低，从而降低了折射率；功率为3 kW时，此时沉积粒子的能量增加到一定程度，且相对与高功率沉积，粒子具有较为充裕的迁徙时间，结晶充分，形成较为致密的结构，具有较高的折射率。

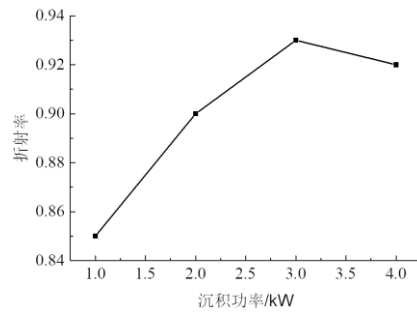


图6 不同功率沉积 Au 薄膜的折射率

Fig.6 Refractive index of Au film at different deposition power

2.2.2 沉积功率对 Au 薄膜透过率的影响

图7显示了不同沉积功率下Au薄膜的透过率，可以看到，在可见光区域，随沉积功率由1 kW增加到4 kW，Au薄膜的透过率曲线B、C、D和E出现了先升后降的趋势，在3 kW时达到最大值65%。由于透过率曲线不能直观对比，选取人眼最敏感的可见光波长(555 nm)进行对比，当沉积功率由1 kW升至4 kW，透过率分别为65.92%，64.41%，61.26%和62.67%，可见随沉积功率增加，沉积的Au薄膜可见光透过率呈下降趋势，当功率再增加时，透过率趋于稳定，不再下降。透过率的这一趋势和折射率的趋势正好相反，可以用金属膜反射率公式进行解释。对于透明薄膜来说，当可见光入射通过薄膜时，光线可以透过，被散(反)射或被吸收。透射与反射遵循式(4):

$$T_{(透过)} + A_{(吸收)} + R_{(反射)} = 1 \tag{4}$$

式中： $T_{(透过)}$ 为透射率； $A_{(吸收)}$ 为吸收率； $R_{(反射)}$ 为反射率。

在空气中，垂直入射时，金属膜的反射率可以表示为^[11]:

$$R = \left[\frac{1 - (n - ik)}{1 + (n - ik)} \right]^2 = \frac{(1 - n)^2 + k^2}{(1 + n)^2 + k^2} \tag{5}$$

式中： n 为折射率； k 为消光系数； $n - ik$ 为复折射率，表示材料存在吸收时的折射率。

可以看出，折射率越大的材料，其反射率越高，从而其透过率较高。从晶体结构来说，低功率沉积

的Au薄膜的晶粒较大,晶界较少,当可见光通过时晶界的散射较少,透过率相对较高。

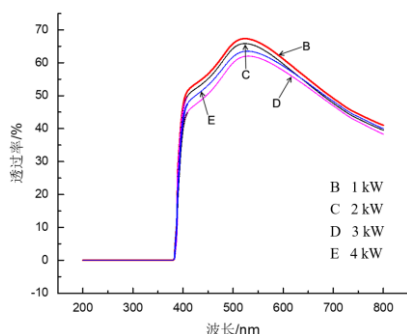


图7 不同功率沉积 Au 薄膜的透过率

Fig.7 Transmittance of Au film at different deposition power

2.3 沉积功率对金膜内应力的影响

Hoffman等^[22]的研究表明,对于单晶或具有完善孔型的薄膜,其内应力为零。这表明,在薄膜形成的初期,薄膜形成的互不相连的岛状结构时,其内应力时比较小的,随着薄膜进一步生长,岛与岛之间相互临近,则产生原子间或分子间的相互作用,形成内应力。对于Au薄膜来说,在形成薄膜的初期,由于表面张力作用,岛状体产生收缩,产生压应力;当岛进一步生长时,岛与岛的间距缩小,岛与岛之间相互作用产生张应力。

由表2和图9可以看出,所沉积的Au薄膜表现为张应力,并且随功率的增加,Au薄膜的内应力呈现规则的上升趋势。这是由于,当沉积功率较小时,Au粒子的沉积速率低,粒子在基片表面有充足的迁移时间,能够形成较大的晶粒,此时薄膜的晶界较少,晶粒再合并长大从而产生收缩的趋势较小,因此薄膜的内应力较小;而功率增加后,薄膜晶粒变小且晶界较多,晶粒之间合并长大的趋势强烈,产生较大的内应力;同时,由于沉积速率较大,Au粒子来不及充分迁移,沉积的Au薄膜缺陷及孔隙率多,因而薄膜内部具有较大的内应力。

表2 不同沉积功率下 Au 薄膜的内应力

Tab.2 Grain size of Au thin film with different depositing power

序号	功率/kW	内应力/MPa
1	1	24.74
2	2	101.00
3	3	286.60
4	4	372.60

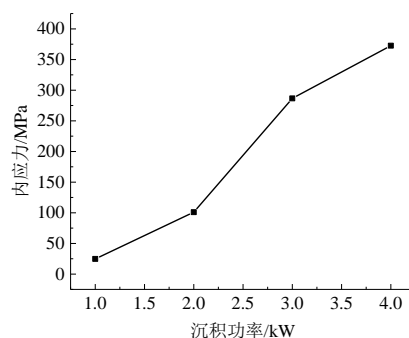


图8 不同功率沉积 Au 薄膜的内应力

Fig.8 Internal stress of Au film at different deposition power

唐武等^[23]的研究表明,择优取向与残余应力有直接的关系,当(111)的择优取向增强时,Au薄膜表现为残余拉应力且随(111)/(200)的相对强度比值增加而增加,同时当Au薄膜的择优取向为(200)时,倾向于出现压应力。虽然于本研究未出现(200)衍射峰,但在(111)与拉应力的关系方面是一致的。Kim等^[24]的研究也表明,在硅表面沉积的Al薄膜的取向与内应力有对应关系。应该说明,虽然大多数研究认为,金属薄膜择优取向与其内应力的特性有一定的关联,但目前尚不能断定薄膜的取向与薄膜的应力存在因果关系。

3 结论

(1) 所沉积的Au薄膜为多晶膜,呈现织构特征,薄膜在(111)晶面择优生长;通过调节薄膜的沉积功率,可以控制薄膜的晶粒尺寸,透光率和内应力;

(2) 随沉积功率的增加,薄膜生长速率增加,晶粒尺寸减小,可见光透过率下降,薄膜的内应力变大。综合各项性能评价,沉积功率为1 kW时的工艺参数最优;

(3) 通过对晶粒生长模式和形态、薄膜内应力状态的分析,揭示了镀Au薄膜工艺与薄膜形态的关系,为选取镀膜工艺提供了思路。

参考文献

- [1] Huang Y, Qiu H, Pan L. Effect of annealing on composition, structure and electrical properties of Au layer grown on different thickness Cr layers[J]. J. Univ. Technol. Beijing, 2004, 11(3): 235-239.
- [2] Stephanie N B, Fu B, Alison J F, et al. Formation of Au, Pt and bimetallic Au-Pt Nanostructures for thermal dewetting

- of single-layer or bilayer thin films[J]. *Nanotechnology*, 2022(33): 235604.
- [3] Reddivari M, Jean M F, et al. Mechanically stable ultrathin flexible metallic Au/Pt/Au tri-layer as an alternative transparent conducting electrode for optoelectronic[J]. *Vacuum*, 2022(206): 111487.
- [4] Xu Y, Wang H Z. Influence of Au doping concentration on structural and optical properties of ZnO: Au Films fabricated through magnetron sputtering[J]. *Optical Materials*, 2020(108): 110433.
- [5] Pintu B, Anindita D, Satyaranjan B. Interaction of size-selected Ag-clusters on Au-thin films: a composition study with in-situ XPS analysis at an elevated temperature[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2021(54): 275301.
- [6] Chen H, Luo X, Wang D. Achieving very high cycle fatigue performance of Au films for flexible electronic application[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 89(30): 65-70.
- [7] Bendvid A, Matin P J, Wiczorek L. Morphology and optical properties of gold thin films prepared by filtered arc deposition[J]. *Thin Solid Film*, 1999, 354(1): 169-175.
- [8] 许小亮, 王焯, 赵亚丽等. 磁控溅射法制备的纳米金薄膜的工艺条件和结构分析[J]. *功能材料*, 2006, 37(8): 1216-1219.
- [9] Faiza J, Sofia J, Mohammad M, et al. Modified optical characteristics of TiO₂/Au/TiO₂ thin composite films[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(17): 22336-22343.
- [10] Fang X, Chee L, Dai J, et al. ITO/Au/ITO sandwich structure for near-infrared plasmonics[J]. *ACS Applied Materials & Interface*, 2014, 6(18): 15743-15752.
- [11] 钟迪生. 真空镀膜[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001: 10-19.
- [12] Chen H L, Luo X M, Wang D. Achieving very high cycle fatigue performance of Au films for flexible electronic application[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 89(30): 65-70.
- [13] Qiu H, Sun J, Tan Y, et al. Structure and internal stress of Au films deposited on SiO₂/Si (100) and mica by dc sputtering[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2004, 5(11): 415-419.
- [14] Semaltianos N G, Wilson E G. Investigation of the surface morphology of thermally evaporated thin gold films on mica, glass, silicon and calcium fluoride substrates by scanning tunneling microscopy[J]. *Thin Solid Films*, 2000, 366(1): 111-116.
- [15] Parviziyan M, Rahimi A F, Goodarzi A, et al. Residual stress improvement of platinum thin film in Au/Pt/Ti/p-GaAs ohmic contact by RF sputtering power[J]. *Applied Surface Science*, 2012(260): 77-79.
- [16] Choi H M, Choi S K, Anderson O, et al. Influence of film density on residual stress and resistivity for Cu thin film deposited by bias sputting[J]. *Thin Solid Film*, 2000, 358(1): 202-205.
- [17] Asa'ad A, Andrew B, Rebecca C, et al. Evaluation of residual stress in sputtered tantalum thin film[J]. *Applied Surface Science*, 2016(371): 571-575.
- [18] 刘明智, 梁康, 熊巍, 沉积参数对磁控溅射镀金膜膜层内应力与微观形貌的影响[J]. *导航与控制*, 2020, 19(6): 98-104.
- [19] Adamik M, Barna P B, Tomov I. Correlation between texture and average grain size in polycrystalline Ag thin films[J]. *Thin Solid Films*. 2000, 359(1): 33-38.
- [20] 吴自勤, 王兵. 薄膜生长[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 170-230.
- [21] 薛增泉. 薄膜物理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1991: 105-120.
- [22] R. W. Hoffman. *Physics of Thin Films* [M]. New York: Academic Pr, 1966: 219.
- [23] 唐武, 徐可为. Au/NiCr/Ta 多层金属膜择优取向与内应力的关系[J]. *金属学报*, 2002, 38(9): 932-935.
- [24] Kim S P, Choi H M, Choi S K. A study on the crystallographic orientation with residual stress and electrical property of Al films deposited by sputtering[J]. *Thin Solid Film*, 1998, 322(1): 298-302.