

磁控溅射等离子体阻抗影响因素研究

王懿¹ 李勇滔^{1*} 李含雁² 金炯³ 孙小孟⁴ 张春雨³

(1. 广西科技大学机械与汽车学院 柳州 545006; 2. 广西科技大学自动化学院 柳州 545006;
3. 浙江赛威科光电科技有限公司 湖州 313200; 4. 中国科学院微电子研究所 北京 100029)

Impedance of Magnetron Sputtering Plasma: A Experiment and Analysis Study

WANG Yi¹, LI Yongtao^{1*}, LI Hanyan², JIN Jiong³, SUN Xiaomeng⁴, ZHANG Chunyu³

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China;

2. School of Automation, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China;

3. Zhejiang SWSAVC Photoelectric Technology Limited, Huzhou 313200, China;

4. Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract Understanding the change rule of plasma impedance in the process of magnetron sputtering discharge is conducive to regulating the impedance matching between power supply and load, so as to maximize the use of sputtering power and improve the coating quality. In order to study the changing trend of plasma impedance characteristics in the process of magnetron sputtering coating, V-I probe is used to measure the plasma impedance and the negative bias voltage of the electrode plate, and the effects of gas flow and sputtering power on the plasma impedance characteristics are studied. The results show that, under the experimental conditions in this paper, the plasma always presents capacitive reactance characteristics. When the gas flow rate increases, the real part R of the plasma impedance increases first and then decreases due to the ionization rate of argon, and the imaginary part X of the impedance decreases first and then increases due to the influence of secondary electrons and sheath. When the sputtering power increases, the influence of ohmic heating and random heating on the real part R of the plasma impedance increases all the time, while the influence of negative bias voltage and sheath on the imaginary part X of the impedance decreases all the time.

Keywords Magnetron sputtering, Plasma impedance, Radio frequency discharge, Discharge parameters

摘要 了解等离子体阻抗在磁控溅射放电过程中的变化规律,有利于调控电源和负载之间的阻抗匹配,达到最大化利用溅射功率,提高镀膜质量的目的。为了研究磁控溅射镀膜工艺过程中等离子体的阻抗特性的变化趋势,本文采用 V-I probe 测量等离子体阻抗大小、极板负偏压等参数,研究了气体流量和溅射功率对等离子体阻抗特性的影响。结果表明,在本文的实验条件下,等离子体始终呈现为容抗特性。当气体流量增大时,受氩气的电离率影响,等离子体阻抗实部 R 呈现先增大后减小的趋势,阻抗虚部 X 受到鞘层的影响呈现先减小后增大的趋势。当溅射功率增大时,等离子体阻抗实部 R 受欧姆加热的影响一直增大,阻抗虚部 X 受到负偏压和鞘层的影响逐渐减小。

关键词 磁控溅射 等离子体阻抗 射频放电 放电参数

中图分类号: O539

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202209015

磁控溅射技术可制备超硬膜、耐腐蚀摩擦薄膜、超导薄膜、磁性薄膜、光学薄膜,以及各种具有特殊功能的薄膜,在工业薄膜制备领域的应用非常广泛^[1-3],对磁控溅射放电等离子体性能的诊断以及相

关物理问题的研究一直是科研人员高度关注的内容。磁控溅射镀膜需要利用射频功率源对溅射气体进行电离激发产生等离子体,而真空腔体内的负载阻值会随着反应时间和反应环境参数的变化而

收稿日期: 2022-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62041402; 61474139), 国家重点研发计划项目 (2016YFF0100201)

* 联系人: E-mail: liyongtao@gxust.edu.cn

改变,从而使得系统出现不同程度的匹配失效,失配严重时甚至无法起辉。实现射频功率源和负载之间快、准、稳的阻抗匹配,减小射频同轴电缆上的反射功率,降低射频源的功率在传输到负载过程中的能量损耗,是高效利用射频电源以及提高镀膜工艺水准的关键所在。因此需要实时监测阻抗的变化,以便调整匹配网络的参数,来达到阻抗匹配的目的。

目前对等离子体特性的研究主要包括实验测试和仿真数值模拟等手段。李卓凡等^[4]通过搭建实验装置和测试平台,研究了滑动放电作用下脉冲重复频率和气体流量对等离子体阻抗特性的影响;赵璐璐等^[5]研究了二次电子,气体压强和驱动频率对低气压容性耦合射频辉光放电特性的影响;黄建军等^[6]自主研发传感器和测试系统对放电管的阻抗值进行计算,得出容性耦合射频激励条件下的激光器等离子体伏安特性曲线;吴勤斌等^[7]利用 COMSOL 软件仿真研究了放电参数对等离子体阻抗特性的影响,并借助最小二乘法拟合曲线得到了等离子体阻抗与放电参数之间的关系式;吴茂成等^[8]研究了射频偏压频率对磁控溅射基片表面离子能量分布特性和离子通量密度性能的影响;Binwal S^[9]公布了一种基于电阻抗用于推断 13.56MHz 磁化容性耦合射频放电中等离子体密度的技术;Bera K 等^[10]研究了窄间隙电容耦合射频放电中的等离子体阻抗,还分析了鞘层中的电子和离子密度分布的情况。

本文借助容性耦合射频磁控溅射台产生等离子体,通过计算机控制阻抗匹配器中可变电容元件接入电路的电容大小,实现负载与射频功率源之间的阻抗匹配。利用 V-I probe 监测腔体内的等离子体阻抗参数,进而分析在磁控溅射过程中,改变放电参数对磁控溅射镀膜腔室内等离子体阻抗特性的影响,有利于后续开发新型阻抗匹配器来提高磁控溅射工艺水平和镀膜质量。

1 实验

1.1 实验器材

SVAC-Filmlab-400S3 型磁控溅射镀膜机,浙江赛威科光电科技有限公司;冷水机;空压机;6L/S 直联旋片泵;620 L/S 复合分子泵;RFG-1000 固态射频电源,中国科学院微电子研究所;阻抗匹配器,中国科学院微电子研究所;MKS/ENI V-I probe,美国

MKS 公司;纯度为 99.99% 的 2 英寸 Al 靶、SiO₂ 靶;2 英寸磁控阴极靶座;无水酒精;氩气。

1.2 实验装置与方法

实验使用溅射频率为 13.56 MHz 的射频源驱动磁控溅射台,通过 V-I probe 的参数测量仪采集不同实验条件下等离子体的阻抗数据,并用计算机记录阻抗匹配器中电容元件以及工作负载偏压等相关数据信息,进而分析磁控溅射放电过程中气体流量和溅射功率对等离子体阻抗特性的影响。实验装置结构示意图如图 1。

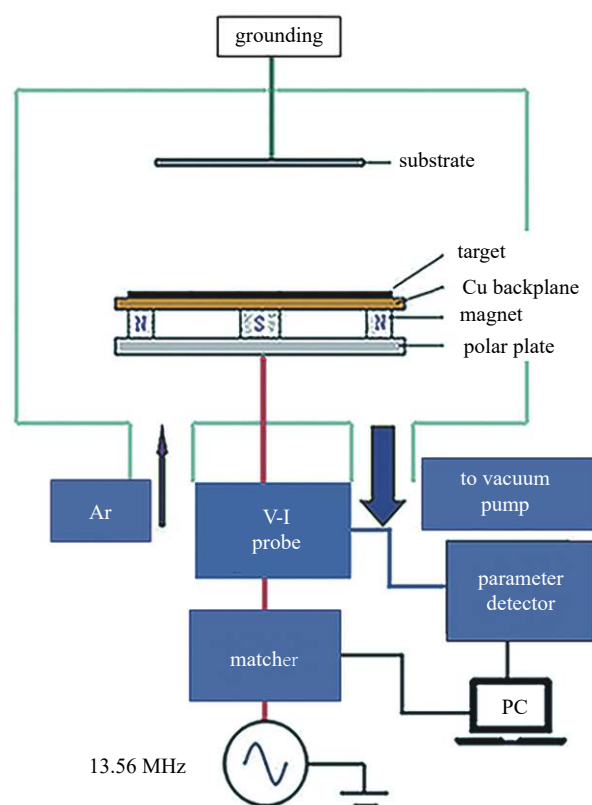


图1 实验装置结构示意图

Fig. 1 Diagram of the structure of the experimental device

考虑到铝薄膜和二氧化硅薄膜在集成电路制备工艺中应用颇为广泛,因此同时选用 Al 靶和 SiO₂ 靶作为实验研究对象,使得研究结果对现实的工业应用具有更好的指导意义。所用的溅射靶材料为 Al 和 SiO₂, 纯度为 99.99%, 厚度为 5 mm, 尺寸为 2 英寸。本实验所用磁控阴极靶座的磁钢材料为烧结钕铁硼, 表面充磁强度为 4200GS, 溅射区域范围内的磁场分布情况如图 2 所示。

放电前先用无水酒精擦拭靶材, 然后将其安装在真空腔室下部对应尺寸的磁控阴极靶上, 溅射时

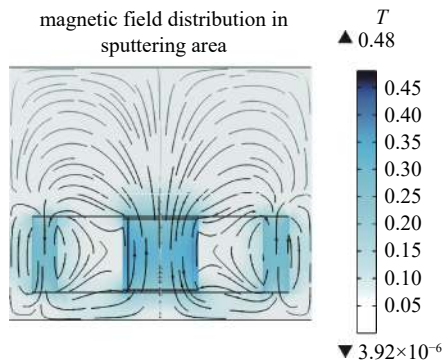


图2 溅射区域的磁场分布

Fig. 2 Magnetic field distribution in sputtering area

采用循环冷水进行冷却,真空腔室壁电气接地。真空系统采用 6 L/S 直联旋片泵和 620 L/S 复合分子泵组成真空机组,系统的极限真空优于 5×10^{-5} Pa,采用高纯氩气(99.99%)作为氛围气体,实验过程中先启动机械泵将真空度抽至小于 10 Pa,然后启动分子泵,将本底真空抽至 10^{-3} Pa 以下,通入高纯度氩气,待气压稳定后,启动射频功率源,通过计算机控制匹配器中电机的转动改变电容大小直至反射功率为 0,记录此时的电容大小、电流的幅值相位、负偏压以及等离子体的阻抗。

实验采用控制变量法在其中一个参数不变的情况下改变另一个参数,分别测出氩气气体流量以及输入功率对等离子体阻抗的影响。根据实验条件和实验安排设定气体流量变化范围为 0 到 200 mL/min(标准状态),射频功率源频率为 13.56 MHz,功率变化范围为 40 到 100 W。为避免设备长时间工作腔室温度对实验结果的影响,每做完一组实验都会关闭电源,等待约 5 min 后重新启动电源进行下一组实验。

1.3 阻抗匹配原理

阻抗匹配可分为两种类型,一种是负载阻抗与信源内阻抗共轭匹配,即模相等且辐角相加为零,此时负载可获得最大功率;另一种是负载阻抗与信源内阻抗相等,即模和辐角都相等,此时负载可获得无失真电压传输。在磁控溅射镀膜工艺中,通常采用第一种获得最大功率的共轭匹配^[11]。

如果直接将射频功率源接在磁控溅射镀膜机上,不仅无法最大化利用电源功率,而且镀膜的质量无法保证。因此需要在射频功率源和负载之间加入一个匹配网络,使负载获得功率源传递的最大功率。本文所用的阻抗匹配器的匹配网络为双可

调电容的 Γ 型网络,图 3 为使用该网络进行阻抗匹配的等效电路图。

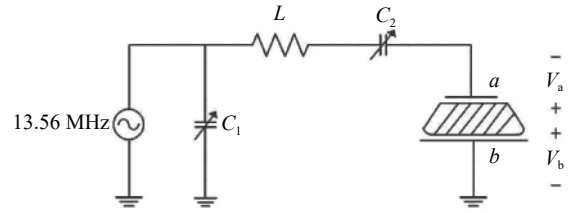


图3 阻抗匹配等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of impedance matching

为了更好的理解这一点,将等离子体看作阻抗为 $Z = R - jX$ 的负载,其中 R 为等离子体的电阻, X 为等离子体的电抗,射频功率源的输出阻抗恒定为 50Ω 。通过调节图 3 中的可变电容元件 $C1$ 和 $C2$ 的电容值大小,使得匹配器能够补偿等离子体阻抗与射频功率源输出阻抗之间的差值,达到共轭匹配的目的,从而使得放电腔室内的等离子体获得最大传输功率。

1.4 V-I probe

V-I probe 是一种先进的多功能射频电压电流传感器,是应用非常广泛的一种等离子体诊断设备。其测量内容包括等离子体中的电子密度、电子温度、时间平均的等离子体功率传输参数、等离子体阻抗等^[12]。本文使用的是美国 MKS 公司生产的 V-I probe,整个 V-I probe 探测系统由传输线、电压电流探头、信号整流模块、模数转换模块、微处理器模块和逻辑数据处理模块组成。

2 实验结果与讨论

2.1 气体流量对等离子体阻抗的影响

实验采用的溅射靶为 2 英寸 Al 靶和 2 英寸 SiO_2 靶,设定溅射功率 50 W,气体流量变化区间为 30~190 mL/min。实验中气体流量从 30 mL/min 开始逐步增加,步长 20 mL/min,每次调节气体流量后等待约 5 min,待气压稳定后调节阻抗匹配器使得反射功率为 0,记录匹配器参数。通过 V-I probe 测出如表 1、表 2 所示各气体流量下的等离子体阻抗大小。

图 4(a) 为根据 Schneider^[13] 提出的由体等离子体等效电路和电极鞘层等效电路串联组成的射频放电等离子体等效电路模型,体等离子体等效电路主要包含随机电子加热的附加等离子体电阻 R_{st} ,电

表 1 等离子体阻抗随气体流量变化 (Al 靶)

Tab. 1 Impact of the gas flow on the plasma impedance (Al target)

Gas flow /(mL/min)	impedance / Ω
30	9.333-j48.905
50	9.618-j48.680
70	9.881-j48.477
90	9.302-j48.223
110	9.060-j48.115
130	8.855-j48.286
150	8.685-j48.431
170	8.629-j48.480
190	8.574-j48.528

表 2 等离子体阻抗随气体流量变化 (SiO₂ 靶)

Tab. 2 Impact of the gas flow on the plasma impedance (SiO₂ target)

Gas flow /(mL/min)	impedance / Ω
30	3.856-j48.536
50	3.910-j48.216
70	3.982-j47.985
90	4.114-j47.901
110	4.192-j47.783
130	4.133-j47.872
150	4.094-j47.930
170	4.019-j48.164
190	3.955-j48.264

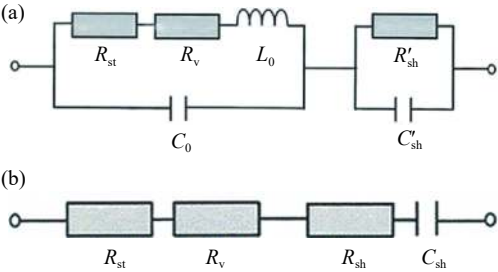


图4 射频放电等离子体等效电路图。(a) 电路原理图, (b) 简化电路图

Fig. 4 Radio frequency discharge plasma equivalent circuit. (a) Schematic, (b) simplified circuit

子和气体原子碰撞产生的电阻 R_v , 位移电流产生的电容 C_0 , 射频电场中电子惯性引起的等离子体电感 L_0 ; 电极鞘层等效电路包含了鞘电容 C'_{sh} 和鞘电阻 R'_{sh} 。对于体等离子体等效电路, 位移电流产生的电容 C_0 只在高压下对等离子体阻抗具有明显的影响作用, 而在本文的低气压实验条件下可以忽略。射频电场中电子惯性引起的等离子体电感 L_0 只有当

溅射频率 $\omega \gg$ 等离子体频率 ω_{ep} 时才能忽略, 而本文给定的实验条件下 $13.56\text{ MHz} \ll \omega_{ep}$, 因此射频电场中电子惯性引起的等离子体电感 L_0 也可忽略不计。此时等效电路可以简化为图 4(b) 所示的一个放电电阻和鞘层电容的串联电路, 即放电等离子体的总阻抗可以表示为:

$$Z = R_{st} + R_v + R_{sh} - i \frac{1}{\omega C_{sh}},$$

所以在此实验条件下的阻抗虚部 X 始终呈现为容抗特性。

考虑到探针及其他不确定性因素对等离子体阻抗测量结果的影响, 在测量值上添加 10% 的误差棒, 等离子体阻抗随气体流量的变化如图 5 所示。

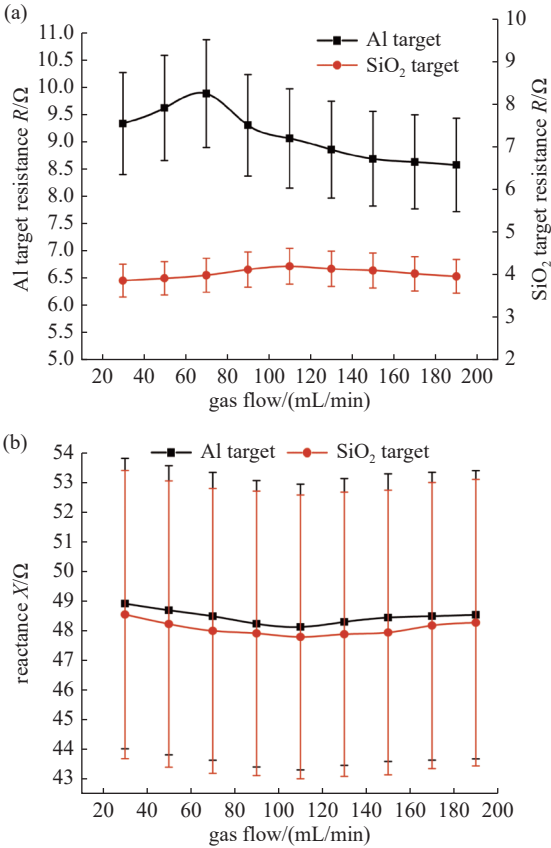


图5 Al 靶和 SiO₂ 靶等离子体阻抗受气体流量变化的影响。(a) 气体流量对电阻的影响, (b) 气体流量对电抗的影响

Fig. 5 Effect of gas flow change on plasma impedance of Al target and SiO₂ target. (a) Influence of gas flow on resistance R , (b) influence of gas flow on reactance X

电子加热机理是射频容性放电研究中不容忽视的核心问题^[14-16], 磁控溅射放电中等离子体的阻抗特性主要受两种电子加热机理的共同影响, 分别为欧姆加热和随机加热。欧姆加热发生在主等离

子体区内,是由做振荡运动的电子与中性粒子碰撞后产生的动量转移造成的。随机加热是由于电子和一个振荡的高压鞘层碰撞产生的,类似于一个球与一面移动的墙壁之间的弹性碰撞^[17]。这两种电子加热为等离子体中电子吸收外界功率的主要来源。在当前实验条件下,整个放电区域的欧姆加热强于随机加热,且随着气体压强和功率的增大,欧姆加热的效果越来越明显,以欧姆加热作为主要加热方式来维持放电。欧姆加热时,由欧姆定律可知:

$$P = \eta j^2 \quad (1)$$

$$\eta = 2.8 \times 10^{-8} / T_e^{3/2} \quad (2)$$

式中, P 为热功率密度, j 为电流密度, η 为等离子体的电阻率, T_e 为电子温度。

由图 5(a) 可以看出,当气体流量逐渐增大时,Al 靶和 SiO₂ 靶溅射产生的等离子体阻抗实部呈现先增大后减小的趋势。这是因为在该实验初期,随着充气量的增加,电子密度逐渐增大,平均电子温度逐渐降低。由式(2)可知,当电子温度减小时,等离子体的电阻率增大,等离子体阻抗实部 R 随之增大。当 Al 靶和 SiO₂ 靶的实验气体流量分别超过 70 mL/min 和 110 mL/min 时,继续增大充气量使得等离子体阻抗实部 R 逐渐降低,这是因为随着气压的升高,在 50 W 的溅射功率下,没有足够的能量对后续通入的氩气进行充分电离,使得溅射区域的电导率增大,从而导致等离子体阻抗实部 R 减小。

图 5(b) 可看出,在该实验条件下气体流量对阻抗虚部 X 的影响较小,等离子体阻抗虚部 X 呈现为一个小范围的先减后增趋势,这是受鞘层的变化影响导致的。在本实验条件下,鞘层厚度可由下式表示:

$$s \approx K (\lambda_{De}^2 l)^{1/3} \quad (3)$$

式中, K 是约等于 1 的系数, l 为平板间距, λ_{De} 为德拜长度,取常用单位表示为:

$$\lambda_{De} (cm) = \left(\frac{\epsilon_0 T_e}{e n_e} \right)^{1/2} \approx 743 \sqrt{T_e n_e} \quad (4)$$

式中 T_e 为电子温度, n_e 为电子密度。实验初期,随着充气量增加,电子密度增加,电子温度下降,由式(3)、(4)可知德拜长度减小使得鞘层厚度减小,等离子体阻抗虚部 X 减小;当充气量继续增大,50 W 溅射功率无法提供足够的能量对氩气进行充分电离,过度频繁的碰撞将导致电子密度下降,从而使得鞘层厚度增大,等离子体阻抗虚部 X 增大。

2.2 溅射功率对等离子体阻抗特性的影响

磁控溅射台是一个非均匀模型,单位面积上的时间平均欧姆加热功率可表示为

$$\bar{S}_{ohm} \approx \frac{1}{2} J_1^2 \int_{-\frac{l}{2}+s_m}^{\frac{l}{2}-s_m} \frac{m v_m}{e^2 n(x)} dx \quad (5)$$

式中, J_1 为单位面积上的电流密度,单位是 A/m²; v_m 为电子碰撞频率,单位是 Hz; e 为一个电子的无符号电量,大小为 1.602×10^{-19} C; $n(x)$ 为的等离子体密度的位置变量的函数,在低气压放电下,可以用等离子体中心处的密度代替,并且不会引起很大的误差。

实验将气体流量分别设定为 40、60、80 mL/min,研究输入功率在 40 W 到 120 W 区间内变化时,等离子体阻抗与输入功率之间的关系。图 6 为等离子体阻抗实部 R 受溅射功率影响的折线图。

由图 6 可知,在输入功率高于 40 W 时,等离子体阻抗随着输入功率的增加而逐渐增大。根据上

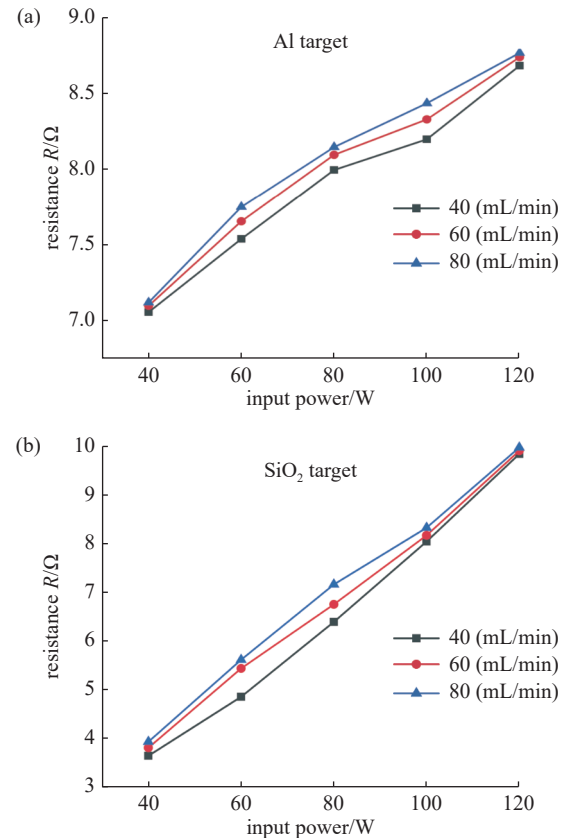


图6 等离子体阻抗实部 R 受输入功率变化的影响。(a) Al 靶折线图, (b) SiO₂ 靶折线图

Fig. 6 Effect of input power variation on real R of plasma impedance. (a) Line chart of Al target, (b) line chart of SiO₂ target

述时间平均欧姆加热功率式(5),当单位面积上的电流密度基本不变时,此时增大溅射输入功率会使得氩气电离率增大,电子的碰撞频率增大,电子密度也增大,二者的比值整体上呈现为一个增大的趋势,在等离子体特性上表现为阻抗实部 R 增大;随着输入功率的增大,电子密度逐渐增大,平均电子温度逐渐降低。由式(2)可知,当电子温度减小时,等离子体的电阻率增大,等离子体阻抗实部 R 随之增大。

实验采用阻抗匹配器测量了不同溅射功率下的负偏压。如图7所示,负偏压随着溅射功率的增大而增大,并在达到一定值后,偏压变化趋势减小并趋于饱和。

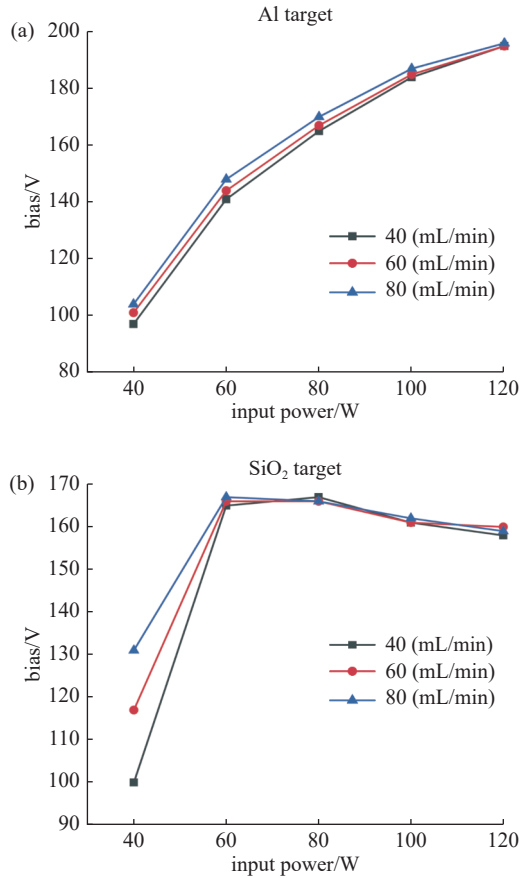


图7 溅射功率的变化对负偏压的影响。(a) Al靶折线图, (b) SiO₂靶折线图

Fig. 7 Effect of sputtering power variation on negative bias. (a) Line chart of Al target, (b) line chart of SiO₂ target

对于磁控溅射台的溅射极板,虚部 X 可由式(6)计算:

$$X = \frac{1}{C_s \omega}, \quad C_s = \frac{\epsilon_0 A}{s} \quad (6)$$

式中 ω 为电源驱动频率, s 为鞘层厚度, ϵ_0 为真空介电常数, A 为电极面积, C_s 为鞘层等效电容。

当溅射功率增加时,负偏压增大使得平均鞘层电位增加^[18],鞘层电位增加会导致鞘层厚度减小^[19]。由式(6)可知,鞘层厚度减小,导致鞘层等效电容变大,从而使得阻抗虚部(电抗)变小,正如图8所呈现出的等离子体容抗特性逐步减小。

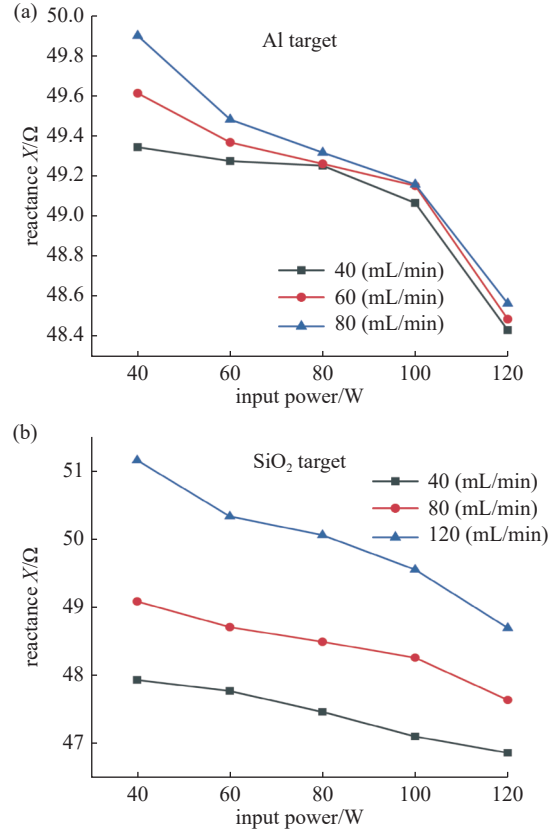


图8 等离子体阻抗虚部 X 受输入功率变化的影响。(a) Al靶折线图, (b) SiO₂靶折线图

Fig. 8 Effect of input power variation on imaginary part X of plasma impedance. (a) Line chart of Al target, (b) line chart of SiO₂ target

3 结论

实验结果表明:溅射功率为 50 W 时,气体流量从 30 增大到 190 mL/min 的过程中,受 Ar 气电离率的影响,等离子体阻抗实部 R 先增大后减小,而等离子体的容抗特性受鞘层的影响先减小后增大;气体流量为 40、60、80 mL/min 时,增大溅射功率使得负偏压逐步增大并趋向饱和,此后再增大溅射功率,对负偏压造成的影响将变得很小。同时负偏压的增大会导致鞘层变薄,使得等离子体容抗特性呈现减小的趋势。而溅射功率增大使得欧姆加热对等离子体的作用效果增强,等离子体阻抗实部 R 随之增大。

本文研究了在磁控溅射放电过程中, 气体流量和溅射功率对等离子体阻抗特性的影响, 对磁控溅射设备的阻抗匹配器设计与镀膜工艺参数选择具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Li F, Zhu Y, Li L H, et al. Review on magnetron sputtering technology and its development[J]. *Vacuum Electronics*, 2011(3): 49–54 (李芬, 朱颖, 李刘合, 等. 磁控溅射技术及其发展[J]. *真空电子技术*, 2011(3): 49–54(in chinese))
- [2] Dong Q, Fan Y D. Unbalanced magnetron sputtering and its application[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 1996(1): 51–57 (董骥, 范毓殿. 非平衡磁控溅射及其应用[J]. *真空科学与技术学报*, 1996(1): 51–57(in chinese))
- [3] Yang W M, Liu Y W, Xu L X, et al. Review of film growth by sputtering technology[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2005(3): 204–210 (杨文茂, 刘艳文, 徐禄祥, 等. 溅射沉积技术的发展及其现状[J]. *真空科学与技术学报*, 2005(3): 204–210(in chinese))
- [4] Li Z F. Study on periodic characteristics and plasma impedance characteristics of pulsed sliding discharge[D]. Zhengzhou University, 2019 (李卓凡. 脉冲滑动放电周期特性及等离子体阻抗特性研究[D]. 河南: 郑州大学, 2019(in chinese))
- [5] Zhao L L. Numerical study on the influence of secondary electron and gas pressure on plasma characteristics in RF capacitive discharges at low pressure [D]. Dalian University of Technology, 2018 (赵璐璐. 低气压射频容性放电中二次电子和气体压强对等离子体特性影响的数值研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018(in chinese))
- [6] Huang J J, Liu Z Z, Liang R Q, et al. Experimental study of electrical characteristics of CCRF discharge[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2002(6): 14–17 (黄建军, 刘正之, 梁荣庆, 等. 容性耦合射频(CCRF)放电等离子体特性实验研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2002(6): 14–17(in chinese))
- [7] Wu Q B, Luo R C, Wang X Y, et al. Impedance of RF capacitive coupled plasma: a simulation and analytical study[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2020, 40(5): 458–464 (吴勤斌, 罗日成, 王学禹, 等. 射频容性耦合等离子体阻抗影响因素研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2020, 40(5): 458–464(in chinese))
- [8] Wu M C, Ye C, Liu X Y. Influence of 27.12 MHz bias on properties of magnetron sputtering ion beam: a methodological study[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2020, 40(4): 373–380 (吴茂成, 叶超, 刘溪悦. 27.12 MHz基片偏压在调控磁控溅射离子能量中的作用研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2020, 40(4): 373–380(in chinese))
- [9] Binwal S, Joshi J K, Karkari S K, et al. An electrical impedance-based technique to infer plasma density in a 13.56-MHz magnetized capacitive coupled RF discharge[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, 49(11): 3582–3588
- [10] Bera K, Chen C A, Vitello P. Plasma impedance in a narrow gap capacitively coupled RF discharge[J]. *IEEE transactions on plasma science*, 2002, 30(1): 144–145
- [11] LIU J S. Simulation and design of high power radio frequency laser power supply[D]. Huazhong University of Science and Technology, 2009.05 (刘继舒. 大功率射频激光电源的仿真设计[D]. 华中科技大学, 2009.05(in chinese))
- [12] [12] Xue C. Experimental investigations of pulse modulated radio frequency inductive coupled Ar/O₂ and Ar plasmas[D]. Dalian University of Technology, 2019 (薛婵. 脉冲调制射频感性耦合Ar/O₂及Ar等离子体的实验诊断研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019(in chinese))
- [13] F. Schneider, The Mechanism of high frequency discharge between level plates [Z]. *Angew. Phys.* 6(1954) 456
- [14] Godyak V A, Piejak R B. Abnormally low electron energy and heating-mode transition in a low-pressure argon rf discharge at 13.56 MHz[J]. *Physical review letters*, 1990, 65(8): 996
- [15] Chabert P, Levif P, Raimbault J L, et al. Electron heating in multiple-frequency capacitive discharges[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2006, 48(12B): B231–B237
- [16] Lafleur T, Boswell R W, Booth J P. Enhanced sheath heating in capacitively coupled discharges due to non-sinusoidal voltage waveforms[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(19): 194101
- [17] Michael A L, Allan J L. Principles of plasma discharges and materials processing, second edition [M]. John Wiley & Sons, 2018
- [18] Stranak V, Herrendorf A P, Drache S, et al. Plasma diagnostics of low pressure high power impulse magnetron sputtering assisted by electron cyclotron wave resonance plasma[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012 (9)
- [19] Lee H Y, Lee D K, Kang D H, et al. The effect of r. f. substrate bias on the properties of carbon nitride films produced by an inductively coupled plasma chemical vapor deposition[J]. *Surface Coatings Technology*, 2005, 193(1-3): 152–156