

27.12 MHz 基片偏压在调控磁控溅射离子能量中的作用研究

吴茂成 叶超* 刘溪悦
(苏州大学物理科学与技术学院 苏州 215006)

Influence of 27.12 MHz Bias on Properties of Magnetron Sputtering Ion Beam: A Methodological Study

Wu Maocheng, Ye Chao*, Liu Xiyue
(School of Physics Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract Herein, we addressed the problem of bombardment damage and over-sputtering etching, originated from wide energy spreading of ion beam, especially those high energy ions, in film growth by RF magnetron sputtering. The solution was a 27.12 MHz substrate bias. The influence of 27.12 MHz bias on the energy distribution of ion beam was investigated with retarding field energy analyzer. The results show that a 27.12 MHz substrate bias made the difference. To be specific, the bias significantly decreased the density of high-energy ion and simultaneously increased the density of low-energy ion, markedly narrowing the energy spreading, obviously shifting the energy distribution of ion to low energy and greatly improving the film quality, possibly because the bias voltage greatly prolonged the transit time of ions (τ_i) across the sheath, resulting in significantly-increased collision cross-section between sputtering ion and neutrals, and a narrower energy distribution of the ion beam.

Keywords Magnetron sputtering, Substrate bias, Ion energy distribution, Radio frequency discharge

摘要 在基片上施加射频偏压,调控入射离子能量特性,可以有效地控制薄膜生长与性能。常用的13.56 MHz射频基片偏压具有入射离子能量呈展宽发散分布、较强的高能离子轰击作用问题。为解决这些问题,本文通过提高射频偏压频率的方法,采用拒斥场能量分析技术,研究了27.12 MHz射频基片偏压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。结果表明,27.12 MHz射频基片偏压可以有效降低高能离子密度,提高低能离子密度,使离子能量更集中分布,从而降低高能离子对基片的轰击作用。离子能量分布特性的变化与基片偏压频率提高导致的离子渡越鞘层时间 τ_i 延长、离子与中性基团碰撞几率增大有关。碰撞几率增大使高能离子比例降低、低能离子比例增大,离子能量分布变窄,离子能量的发散降低。因此,提高基片射频偏压频率,可以降低离子能量的发散和高能离子对基片产生的不利作用。

关键词 磁控溅射 基片偏压 离子能量分布 射频放电

中图分类号: O539 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjovst.2020.04.16

磁控溅射是应用广泛的薄膜沉积方法^[1-2]。在薄膜沉积过程中,为了控制薄膜生长、制备特殊结构、改善薄膜性能,利用基片偏压调控入射基片的离子能量,从而调控薄膜生长,成为重要的技术手段^[3-4]。大量的研究工作表明,利用基片偏压可以有效地控制或改善薄膜的生长与结构性能(沉积速率、结晶性能、

表面粗糙度、晶粒尺寸)、力学性能(应力、硬度、附着性能、摩擦性能)、电学性能(电阻率)、光学性能(光学带隙、折射率、透光率)和化学成分^[5-12]。

当基片上施加偏压功率时,由于等离子体中电子和离子迁移率的差异,在基片表面形成负的自偏

收稿日期: 2019-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(Grant No 11675118)

* 联系人: Tel: (0512) 69157032; E-mail: eye@suda.edu.cn

压^[9,13]。在自偏压作用下,离子能量增强。当这些离子到达基片表面时,它们将动能转移给吸附原子,使吸附原子表面迁移扩散运动发生变化,从而影响薄膜的生长、结构和性能^[14]。在利用基片偏压调控薄膜生长的研究工作中,人们主要关注基片偏压(或功率)与薄膜生长和性能之间的关联,认为薄膜生长和性能的改善主要与基片偏压作用下高能离子的轰击作用有关^[13,15-17]。但是,近年来一些研究工作表明,薄膜生长和性能的改善不能简单归结于高能离子的轰击作用,只有适度的基片偏压、适中的离子能量,才能有效地改善薄膜的电性能,过高能量的离子轰击不能改善薄膜的电性能^[8-24]。为了更好地理解基片偏压对薄膜生长作用的可能机制,人们通过数值模拟和实验测量研究了基片偏压作用下的离子能量性能,发现达到基片的离子,其能量在一定范围内分布,基片上施加射频偏压对离子能量分布特性具有较大的影响^[19-21],而对于薄膜性能的调控,离子能量分布具有重要的作用^[24-25]。

射频偏压是施加基片偏压的一种重要方式,最常用的射频偏压频率为 13.56 MHz。但是,当基片施加 13.56 MHz 射频偏压时,到达基片表面的离子,其能量呈双峰展宽分布,覆盖低能至高能的宽能量区域,低能离子有益于薄膜性能的改善,而高能离子则起相反的作用^[22-23,26]。因此,如何调控离子能量,使离子能量分布更集中,并减少高能离子的比例,是射频基片偏压调控薄膜生长技术需要进一步解决的问题。与直流偏压不同的是,射频偏压的施加将导致基片表面鞘层发生振荡,鞘层内电场随时间和位置的变化,以及鞘层内的碰撞过程,将影响基片表面的离子能量分布特性^[26]。由于鞘层振荡及鞘层内的碰撞过程与偏压频率、电压和放电气压密切相关,因此,基片表面的离子能量分布特性决定于射频偏压的频率、电压和放电气压。根据多频等离子体放电离子能量分布特性的研究结果,提高射频频率有助于降低离子能量的展宽分布^[27],因此,本工作采用 27.12 MHz 射频源作为基片偏压,研究了更高频率的射频基片偏压在调控磁控溅射基片表面离子能量特性中的作用。

1 实验装置

实验采用 2 MHz 射频源驱动磁控溅射、采用 27.12 MHz 射频源施加基片偏压,通过拒斥场能量分析技术,测量了基片台表面的离子能量分布特性

和离子通量密度性能;通过电压-电流($V-I$)探针技术,测量了溅射靶、基片台施加射频功率时的放电特性。选择 2 MHz 射频磁控溅射与 27.12 MHz 射频基片偏压组合,目的是为了减小磁控溅射与基片偏压两个射频放电之间的耦合,从而清楚地研究基片偏压对离子能量的影响。实验在双靶磁控溅射装置上完成,图 1 是实验装置结构示意图。实验采用纯度为 99.99% 的 Ag 靶作为溅射靶,安装在真空室上部,靶呈圆形,直径为 50 mm,厚度为 5 mm,溅射时靶用制冷的循环水冷却。基片台在真空室下部,直径为 100 mm;基片台采用电悬浮设计,可以施加射频偏压;溅射时基片台也采用制冷的循环水冷却。靶中心距基片台表面垂直距离为 70 mm。溅射靶、基片台通过各自的阻抗匹配器施加 2 MHz 和 27.12 MHz 射频功率。真空室壁电气接地。系统真空采用 2X-8 直联机械泵和 600 升/秒的涡轮分子泵组成的真空机组来获得,系统的本底真空优于 5×10^{-4} Pa,采用高纯氩气(99.99%)作为溅射气体,溅射气压选择为 5 和 1 Pa,相应的氩气流量为 30 和 5 mL/min(标准状态)。

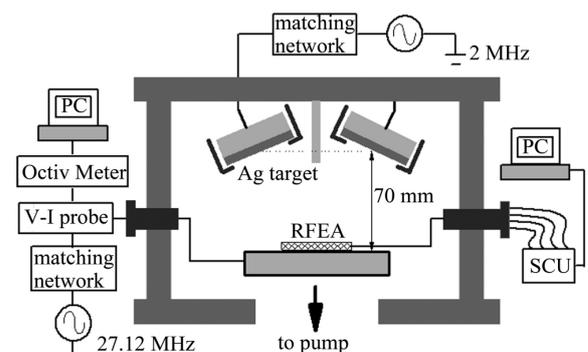


图1 磁控溅射实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the film growth reactor with the substrate biased at 27.12 MHz

基片台表面的离子能量分布特性和离子通量密度采用 Impedans 公司(爱尔兰)的 Semion HV-2500 拒斥场能量分析仪(RFEA)测量,测量探头置于基片台上,与基片台等电位。Semion HV-2500 RFEA 可测量的最大离子能量为 2500 eV,工作气压低于 100 Pa,工作气体温度低于 200 °C,可测量的偏压频率在 1 kHz ~ 100 MHz 之间,可承受最大偏压为 1 kV。测量探头的直径为 50 mm,探头上有 37 个取样口,每个取样口直径 0.83 mm,因此,总的离子接收面积为 21.5 mm²。实验时,通过改变栅极电位 φ_r ,

测量栅极电位 φ_r 与离子流 I_c 关系 φ_r-I_c ,由下式得到离子速度分布函数(IVDF) [28-29]

$$f(\text{IVVDF}) = \frac{m}{e^2} \cdot \frac{1}{T_g A_0} \cdot \frac{dI_c(\varphi_r)}{d\varphi_r} \quad (1)$$

式中 T_g 是栅格的总几何透明度 A_0 是总的离子接收面积 m_i 是离子质量。本实验采用氩气溅射 Ag 靶, 探头取样口接收到的离子包含了溅射的 Ag 离子和气体放电形成的 Ar 离子。由于 Ag 离子与 Ar 离子比例难于精确确定, 因此 m_i 近似取 Ag 离子与 Ar 离子质量平均值, 即 $m_i = (m_{\text{Ag}} + m_{\text{Ar}}) / 2$ 。

磁控溅射和射频基片偏压放电的电性能参数采用 Impedans 公司的 Octiv 射频 V-I 探针测量。这种射频 V-I 探针将射频测量的定向耦合器技术与普通的电流-电压探针技术相结合, 可以同时完成射频功率的在线测量和电流-电压之间相位的精确标定 [30] 因此, 可以测量真实放电功率、放电电压、放电电流、相位和放电阻抗。Octiv 射频 V-I 探针适用的频率范围为 350 kHz ~ 100 MHz, 采用固定频率点测量模式。本实验室探针定制的 5 个固定频率点为 2 MHz、13.56 MHz、27.12 MHz、60 MHz 和 100 MHz,

探针可测量的最大功率为 12.5 kW, 方均根电压 V_{rms} 为 20 ~ 3000 V, 方均根电流 I_{rms} 为 0.1 ~ 20 A, 相位为 0 ~ 180°。实验中, 射频 V-I 探头置于射频阻抗匹配器与溅射靶或基片台之间, 即采用匹配器后置安装方式, 可以测量溅射靶、基片台施加射频功率时的真实功率、放电电压。

2 实验结果与讨论

图 2 为溅射气压 5 Pa 下在基片台测得的 IVDF, 其中 2 MHz 溅射功率为 83.3 和 194.2 W 两个功率条件。当基片未加偏压 ($P_{\text{bias}} = 0$ W) 时, 在溅射功率为 83.3 W 时(图 2(a)), IVDF 呈现近似单峰分布, 主峰(E) 位于 48.9 eV 处, 高能和低能区存在许多弱峰, 这表明此时到达基片的离子除了最可几的 48.9 eV 附近离子, 还存在一些高能、低能离子; 当溅射功率增大到 194.2 W 时(图 2(b)), IVDF 呈现展宽的双峰分布, 高能峰(E_{max}) 位于 77.8 eV 处, 低能峰(E_{min}) 位于 58.3 eV 处, 其他高能和低能区的弱峰明显减少。

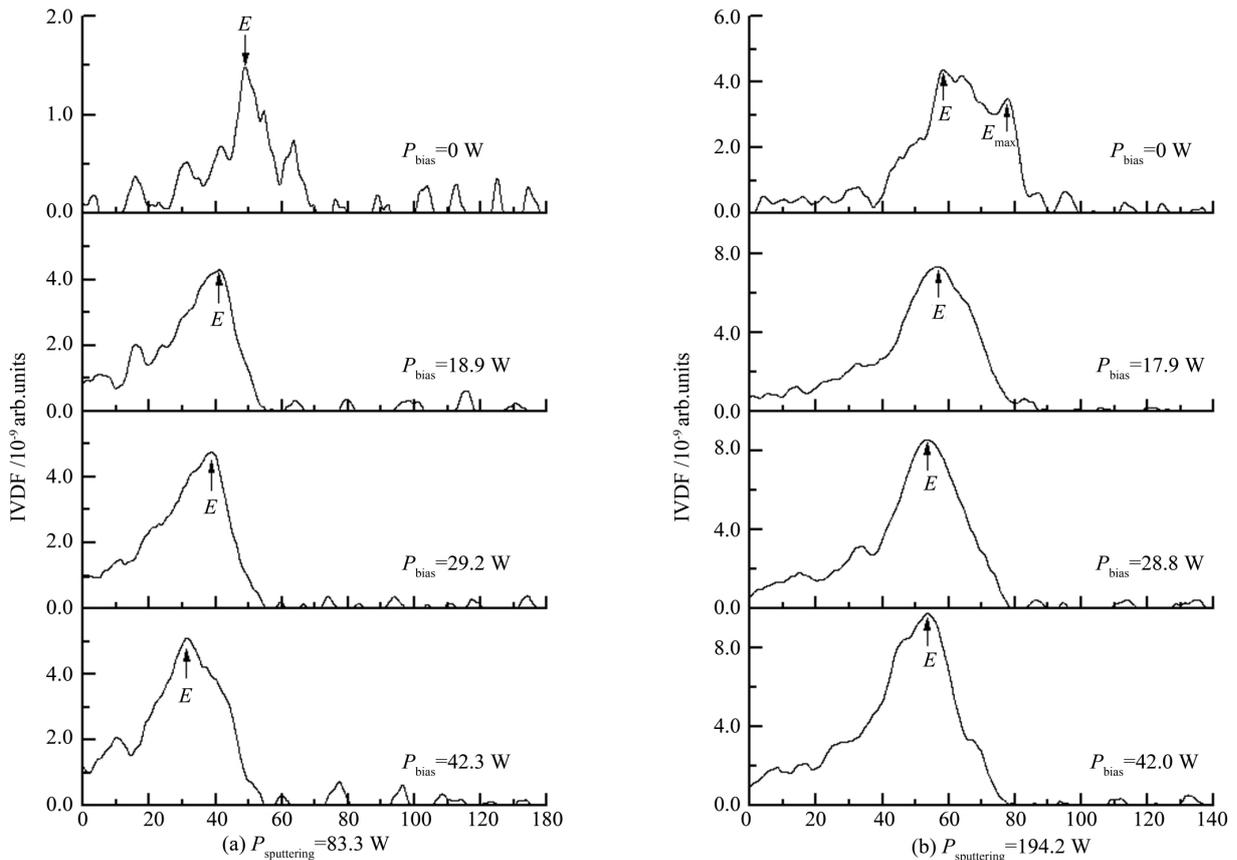


图2 放电气压5 Pa、溅射功率83.3 W 194.2 W时IVDF随基片偏压功率的变化

Fig.2 Measured energy distributions of the ion depend on the bias power at 5 Pa

当基片施加 27.12 MHz 偏压后,溅射功率为 83.3 W 时(图 2(a)),IVDF 均呈现展宽的单峰分布,高能区的弱峰减少,低能区的弱峰与主峰相融合形成展宽的单峰。随着偏压功率 P_{bias} 从 18.9 W 增大到 42.3 W,主峰(E)从 41.1 eV 移动到 31.4 eV 处,最可几离子能量明显减小。当溅射功率为 194.2 W 时(图 2(b)),IVDF 也都呈现展宽的单峰分布,同样高能区的弱峰减少,低能区的弱峰也与主峰相融合形成展宽分布。随着偏压功率 P_{bias} 从 17.9 W 增大到 42.0 W,主峰(E)从 56.7 eV 移动到 53.5 eV 处,最可几离子能量小于基片未加偏压时双峰分布的低能值(58.3 eV)。因此,在溅射气压 5 Pa 时,随着偏压功率增加,IVDF 均呈现单峰结构,主峰向低能侧移动,高能峰明显减少,这意味着低能

离子比例增大,高能离子比例降低,到达基片的离子能量分布更集中,离子能量的发散得到有效抑制。

当溅射气压降低到 1 Pa 时,2 MHz 溅射功率为 83.5 和 179.7 W 两个功率条件。基片未加偏压($P_{bias} = 0$ W)时,在溅射功率为 83.5 W 时(图 3(a)),IVDF 呈现多峰分布,高能峰(E_{max})位于 95.4 eV 处,低能峰(E_{min})位于 64.7 eV 处,低能区存在较多的弱峰;当溅射功率增大到 179.7 W(图 3(b))时,IVDF 呈现展宽的双峰分布,高能峰(E_{max})位于 97.3 eV 处,低能峰(E_{min})位于 58.7 eV 处,其他高能和低能区的弱峰减少。与溅射气压 5 Pa 时的结果相比较,降低放电电压后,到达基片表面的离子能量增强,因此较低气压下溅射放电,高能离子对基片的轰击作用增强。

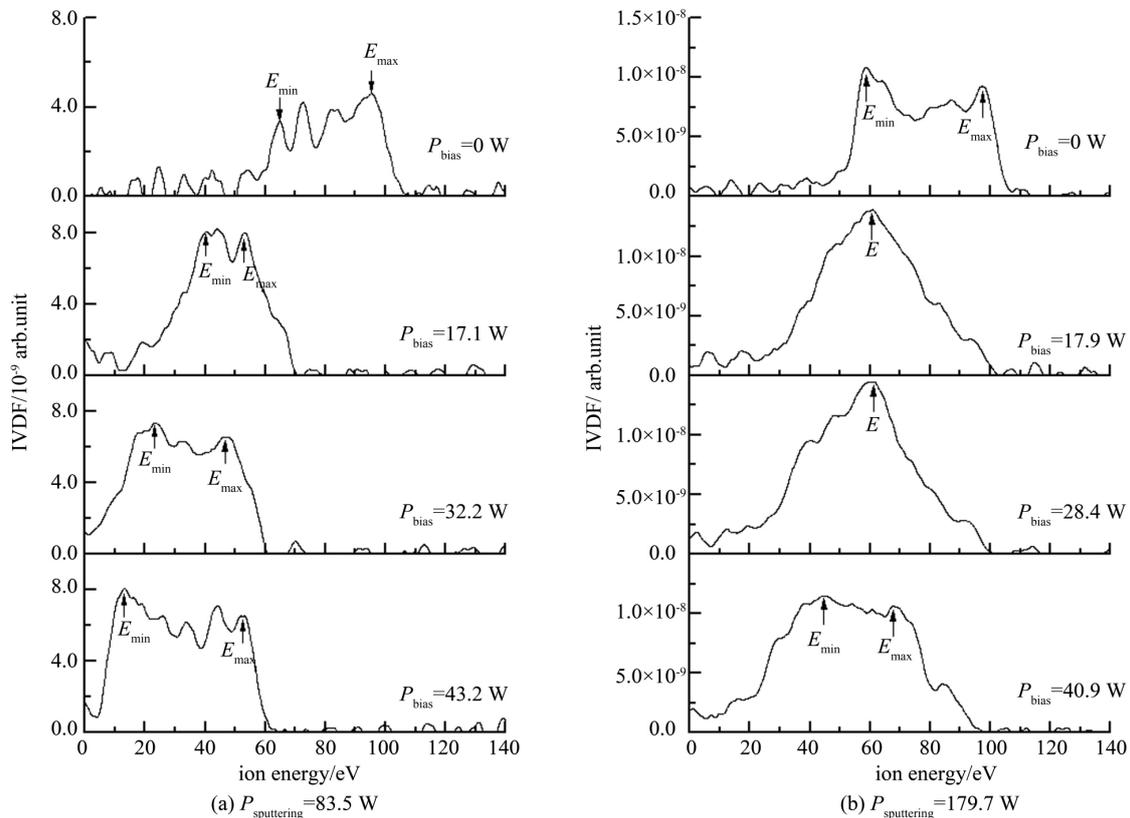


图3 放电气压1 Pa、溅射功率 83.5 W 179.7 W时IVDF随基片偏压功率的变化

Fig.3 Measured energy distributions of the ion depend on the bias powder at 1 Pa

当基片施加 27.12 MHz 偏压后,溅射功率为 83.5 W 时(图 3(a)),随着偏压功率 P_{bias} 从 17.1 增大到 43.2 W,IVDF 从窄双峰分布演变到展宽的双峰分布,低能峰(E_{min})从 40.3 eV 移动到 13.3 eV 处,高能峰(E_{max})从 53.2 eV 移动到 52.3 eV 处,因此到达基片的低能离子比例显著增加、高能离子比

例显著降低。溅射功率为 179.7 W 时(图 3(b)),随着偏压功率 P_{bias} 从 17.9 W 增大到 28.4 W,IVDF 呈现展宽的单峰分布,主峰(E)在 60.8 ~ 61.2 eV 之间,与基片未加偏压($P_{bias} = 0$ W)时 IVDF 双峰分布的低能峰位置接近。当偏压功率 P_{bias} 进一步增大到 40.9 W,IVDF 近似呈双峰分布,高能峰(E_{max})

位于 67.9 eV 处, 低能峰 (E_{\min}) 位于 44.6 eV 处。由图 3(b) 可见, 随着基片偏压功率的增大, IVDF 分布中高能离子比例减小, 低能离子比例增大。因此, 在溅射气压 1 Pa 时, 基片偏压可以有效地提高低能离子比例, 降低高能离子比例, 降低高能离子对基片的轰击作用。

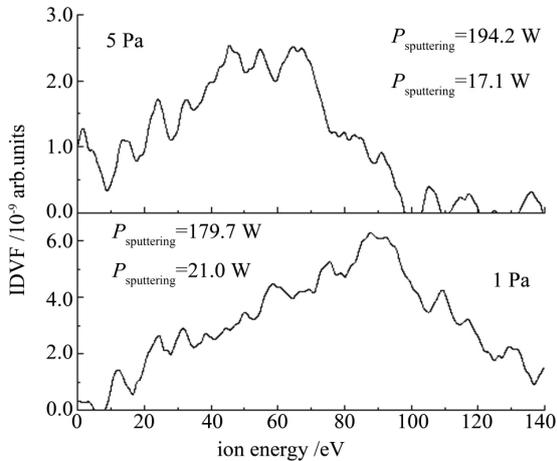


图4 施加13.56 MHz射频基片偏压, 放电气压5 Pa、1 Pa时的IVDF特性

Fig.4 Ion energy profile measured at 5 Pa and 1 Pa

将上述结果与 13.56 MHz 射频偏压时基片表面离子能量的分布特性(图 4) 相比, 可以发现, 施加 13.56 MHz 射频基片偏压时, 到达基片的离子, 能量呈明显的展宽分布, 高能离子的能量达到 100 ~ 140 eV, 通过提高基片偏压频率(27.12 MHz), 这种能量展宽分布可以显著改善。

实验进一步测量了到达基片表面的离子通量密度, 图 5 分别为放电气压 5、1 Pa 下离子通量密度随基片偏压功率的变化关系, 可见离子通量密度均随基片偏压功率 P_{bias} 的增加而增大。另外, 比较图 5 中曲线 1 和 3, 可见降低放电气压可以使离子通量密度增大, 例如, 在偏压功率 $P_{\text{bias}} = 40.7$ W、溅射功率 $P_{\text{sputtering}} = 83.3 \sim 83.5$ W 时, 放电气压从 5 Pa 降低到 1 Pa, 离子通量密度增大 2.3 倍。比较图 5 中曲线 3 和 4, 可见提高溅射功率也可以使离子通量密度增大, 例如, 在偏压功率 $P_{\text{bias}} = 40.7$ W、放电气压 1 Pa 时, 溅射功率 $P_{\text{sputtering}}$ 从 83.5 W 增大到 179.7 W, 离子通量密度增大 1.9 倍。

根据上述结果, 采用 27.12 MHz 射频基片偏压调控到达基片的离子, 可以有效地降低高能离子的比例、提高低能离子比例, 使离子能量分布更集中, 并降低高能离子对基片的轰击作用, 因此, 较好地解

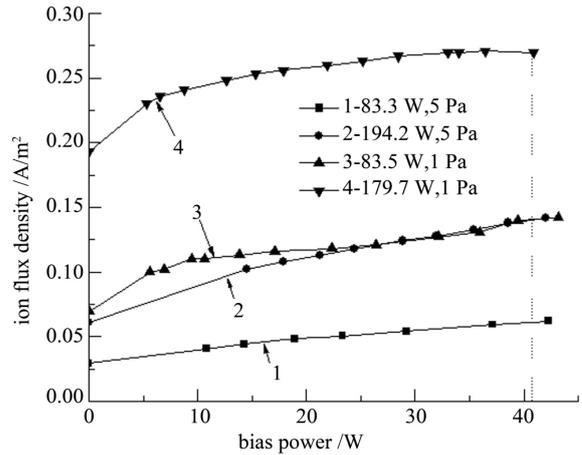


图5 放电气压5 Pa、1 Pa时离子通量密度随基片偏压功率的变化关系

Fig.5 Impact of the bias power on the ion beam flux

决了 13.56 MHz 射频基片偏压作用导致的基片离子能量的展宽分布、离子能量发散、高能离子对基片轰击等问题。

对于 27.12 MHz 基片偏压作用下 IVDF 中高能离子降低、低能离子增加、离子能量分布更集中的特性, 可能主要与射频鞘层振荡、鞘层宽度减小以及鞘层内的碰撞效应有关^[15-26]。当离子进入鞘层时, 离子穿越鞘层的渡越时间 τ_i 决定了到达基片表面离子的能量分布特性, 即 IVDF 形态, 而离子渡越时间与射频频率、鞘层电位和鞘层厚度有关^[31]。当施加 27.12 MHz 射频基片偏压时, 由于频率的提高, 离子对鞘电场的响应使得离子渡越鞘层的时间 τ_i 将延长, 离子与中性基团之间的碰撞几率增大, 因此, 在溅射气压 5 Pa 时, 随着偏压功率增加, 高能离子比例降低, 低能离子比例增大, IVDF 均呈现单峰结构, 主峰向低能侧移动, 离子能量分布更集中。对于 1 Pa 溅射气压, 在低溅射功率 ($P_{\text{sputtering}} = 83.5$ W) 时, 由于中性基团密度的降低和较低的离子密度(图 5), 离子与中性基团之间的碰撞几率比溅射气压 5 Pa 时低, 因此 IVDF 从窄双峰分布演变到展宽的双峰分布, 高能离子与低能离子同时存在。当溅射功率 $P_{\text{sputtering}}$ 增大到 179.7 W 时, 由于离子密度的大幅度提高(图 5), 离子与中性基团之间的碰撞几率增大, 导致偏压功率 $P_{\text{bias}} = 17.9 \sim 28.4$ W 之间的 IVDF 呈现展宽单峰结构, 主峰向低能侧移动, 高能峰明显减少。而对于 $P_{\text{sputtering}} = 179.7$ W、 $P_{\text{bias}} = 40.9$ W 时 IVDF 呈现的展宽近双峰结构, 可能与鞘层厚度减小有关。实验采用 V-I 探针测量了放电时负偏压随基片偏压功率的变化关系, 如图 5 所示, 可见随着偏压功率的增大, 负偏压增大。随着负偏压增大,

平均鞘层电位增加^[32],鞘层电位的增加将导致鞘层厚度减小^[15],离子渡越鞘层的时间 τ_i 将减小,结果离子和中性基团之间的碰撞几率降低,结果高能离子与低能离子同时存在,IVDF呈现展宽近双峰结构。另外,鞘电压的非正弦特性^[32]也可能对27.12 MHz基片偏压作用下IVDF特性产生影响。当偏压施加到基片上时,鞘电压的最小值变化比最大值变化更慢,更多离子在电压最小值阶段进入鞘层,因此形成低能峰。在较高的鞘电压下,由于离子与中性基团碰撞,增加了低能离子的产生几率^[33]。因此,27.12 MHz基片偏压的施加可以导致更多低能离子的产生,最可几离子能量减小,IVDF向低能区扩展。

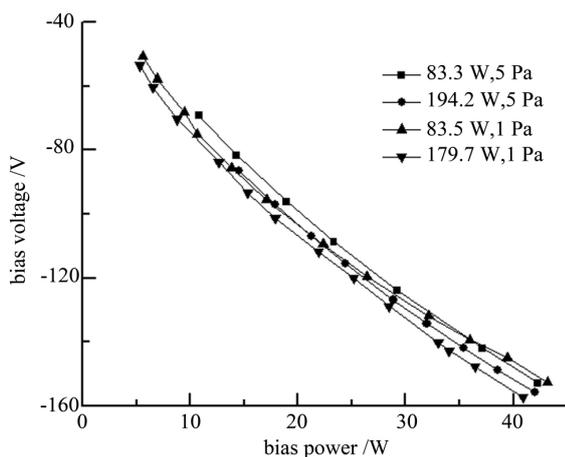


图6 放电电压5 Pa、1 Pa时放电电压随基片偏压功率的变化关系

Fig.6 Dependence of the bias voltage on the bias power

3 结论

在薄膜沉积工艺中,在基片上施加射频偏压,调控入射离子能量特性,从而控制薄膜生长与性能,是改善薄膜性能的重要技术。研究偏压作用机制,有助于深入理解薄膜性能改善的缘由。在利用基片偏压调控薄膜性能的大量研究工作中,常用的基片偏压为13.56 MHz射频基片偏压。通过基片偏压放电的等离子体诊断测量和模拟研究,发现13.56 MHz射频基片偏压具有入射离子能量呈展宽发散分布、较强的高能离子轰击作用问题。为解决这些问题,本文通过提高射频偏压频率方法,采用拒斥场能量分析技术,开展了27.12 MHz射频基片偏压下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研究。结果表明,在基片上施加27.12 MHz射频偏压,可以有效降低到达基片的高能离子密度,提高低能离子密度,使离子能量更趋于集中分

布,从而降低高能离子对基片的轰击作用。离子能量分布特性的变化与基片偏压频率提高导致的离子渡越鞘层时间 τ_i 延长、离子与中性基团碰撞几率增大有关。碰撞几率增大使高能离子比例降低、低能离子比例增大,离子能量分布变窄,离子能量的发散降低。因此,提高基片射频偏压频率,可以降低离子能量的发散和高能离子对基片产生的不利作用,较好地解决了13.56 MHz射频基片偏压的问题,对于利用基片偏压调控入射基片的离子能量,调控薄膜生长的相关应用,具有一定的指导作用。

参考文献

- [1] Kelly P J, Arnell R D. Magnetron Sputtering: A Review of Recent Developments and Applications [J]. Vacuum, 2000, 56(3): 159-172
- [2] BrZÄauer G, Szyszka B, Vergöhl M, et al. Magnetron Sputtering-Milestones of 30 Years [J]. Vacuum, 2010, 84(12): 1354-1359
- [3] Nakao S, Yukimura K, Nakano S, et al. DLC Coating by HiPIMS: The Influence of Substrate Bias Voltage [J]. IEEE Transaction Plasma Science, 2013, 41(8): 1819-1829
- [4] Zhang G, Yan P, Wang P, et al. The Effect of Applied Substrate Negative Bias Voltage on the Structure and Properties of Al-Containing a-C:H Thin Films [J]. Surface Coatings Technology, 2008, 202(12): 2684-2689
- [5] Lv Y, Ji L, Liu X, et al. Influence of Substrate Bias Voltage on Structure and Properties of the CrAlN Films Deposited by Unbalanced Magnetron Sputtering [J]. Applied Surface Science, 2012, 258(8): 3864-3870
- [6] Wang P, Takeno T, Fontaine J, et al. Effects of Substrate Bias Voltage and Target Sputtering Power on the Structural and Tribological Properties of Carbon Nitride Coatings [J]. Materials Chemistry Physics, 2014, 145(3): 434-440
- [7] Kumar M, Mitra R. Effect of Substrate Bias on Microstructure and Properties of Ni-TiN Nanocomposite Thin Films Deposited by Reactive Magnetron Co-Sputtering [J]. Surface Coatings Technology, 2014, 251: 239-246
- [8] Saoula N, Madaoui N, Tadjine R, et al. Influence of Substrate Bias on the Structure and Properties of TiCN Films Deposited by Radio-Frequency Magnetron Sputtering [J]. Thin Solid Films, 2016, 616: 521-529
- [9] Chen X, Xi Y, Meng J, et al. Effects of Substrate Bias Voltage on Mechanical Properties and Tribological Behaviors of RF Sputtered Multilayer TiN/CrAlN Films [J]. Journal Alloys Compounds, 2016, 665: 210-217

- [10] Priyadarshini B G ,Kumar Gupta M ,Ghosh S ,et al. Role of Substrate Bias During Deposition of Magnetron Sputtered Ni ,Ti and Ni – Ti Thin Films [J]. Surface Engineering 2013 ,29(9) : 689 –694
- [11] Azhan N H ,Su K ,Okimura K ,et al. Radio Frequency Substrate Biasing Effects on the Insulator–Metal Transition Behavior of Reactively Sputtered VO₂ Films on Sapphire (001) [J]. Journal Applied Physics ,2015 ,117(18) : 185307
- [12] Prathyusha T ,Srikanth T ,Sivasankar Reddy A ,et al. Effect of Substrate Bias Voltage and Substrate Temperature on the Physical Properties of dc Magnetron Sputtered SnO₂ Thin Films [J]. Optik 2016 ,127(20) : 9457 –9463
- [13] Rosenblum M P ,Thompson M J ,Street R A. The Role of RF Substrate Bias on the Growth and Properties of Plasma Deposited a-Si: H [J]. AIP Conference Proceedings , 1981 ,73: 42 –46
- [14] Shi J ,Kojima D ,Hashimoto M. The Interaction Between Platinum Films and Silicon Substrates: Effects of Substrate Bias During Sputtering Deposition [J]. Journal Applied Physics 2000 ,88(3) : 1679 –1683
- [15] 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
- [16] Abdallah B ,Chala A ,Jouan P Y ,et al. Deposition of AlN Films by Reactive Sputtering: Effect of Radio Frequency Substrate Bias [J]. Thin Solid Films ,2007 ,515(18) : 7105 –7108
- [17] Shaginyan L R ,Fendrych F ,Soukup L ,et al. CN_x H_y Films Obtained by ECR Plasma Activated CVD: The Role of Substrate Bias (DC, RF) and Some Other Deposition Parameters in Growth Mechanisms [J]. Surface Coatings Technology ,1999 ,116: 65 –73
- [18] Karwal S ,Verheijen M A ,Williams B L ,et al. Low Resistivity HfNx Grown by Plasma-Assisted ALD with External rf Substrate Biasing [J]. Journal Materials Chemistry C 2018 ,6(15) : 3917 –3926
- [19] Jeong Y D ,Lee Y J ,Kwon D C ,et al. Fluid Simulation of a Pulse-Modulated , Inductively Coupled Plasma Discharge with Radio Frequency Bias [J]. Current Applied Physics 2017 ,17(3) : 403 –408
- [20] Liu Y ,Ye C ,He H ,et al. Plasma Property of Inductively Coupled Discharge and Substrate Bias Co-Assisted Very-High-Frequency Magnetron Sputtering [J]. Thin Solid Films 2015 ,579: 1 –8
- [21] Liu Y ,Ye C ,He H ,et al. Effect of Frequency and Power of Bias Applied to Substrate on Plasma Property of Very-High-Frequency magnetron Sputtering [J]. Plasma Science Technology 2015 ,17(7) : 583 –588
- [22] Profijt H B ,van de Sanden M C M ,Kessels W M M. Substrate Biasing During Plasma-Assisted ALD for Crystalline Phase-Control of TiO₂ Thin Films [J]. Electrochemical Solid-State Letters 2012 ,15(2) : G1 –G3
- [23] Zhu M ,Ye C ,Wang X Y ,et al. Effect of Radio-Frequency Substrate Bias on Ions Property and Sputtering Behavior of 2MHz Magnetron Sputtering [J]. Plasma Science Technology 2019 ,21(1) : 015507
- [24] Bedra L ,Thomann A L ,Semmar N ,et al. Highly Sensitive Measurements of the Energy Transferred During Plasma Sputter Deposition of Metals [J]. Journal Physics D-Applied Physics 2010 ,43(6) : 065202
- [25] Prenzel M ,Kortmann A ,Stein A ,et al. Bimodal Substrate Biasing to Control γ -Al₂O₃ Deposition During Reactive Magnetron Sputtering [J]. Journal Applied Physics , 2013 ,114(11) : 113301
- [26] Mizutani N ,Hayashi T. Ion Energy Distribution at an r. f.-Biased Electrode in an Inductively Coupled Plasma Affected by Collisions in a Sheath [J]. Thin Solid Films , 2000 ,374(2) : 167 –174
- [27] Holber W M ,Forster J. Ion Energetics in Electron-Cyclotron Resonance Discharges [J]. Journal Vacuum Science Technology A-Vacuum Surfaces Films ,1990 ,8(5) : 3720 –3725
- [28] Stranak V ,Drache S ,Bogdanowicz R et al. Effect of Mid-Frequency Discharge Assistance on Dual-High Power Impulse Magnetron Sputtering [J]. Surface Coatings Technology 2012 ,206(11-12) : 2801 –2809
- [29] Stranak V ,Wulff H ,Bogdanowicz R ,et al. Growth and Properties of Ti-Cu Films with Respect to Plasma Parameters in Dual-Magnetron Sputtering Discharges [J]. European Physical Journal D 2011 ,64(2-3) : 427 –435
- [30] Gahan D ,Hopkins M B. In-Line Sensor for Accurate rf Power Measurements [J]. Review of Scientific Instruments 2005 ,76(10) : 106107
- [31] Depla D ,Mahieu S ,De Gryse R. Magnetron Sputter Deposition: Linking Discharge Voltage with Target Properties [J]. Thin Solid Films 2009 ,517(9) : 2825 –2839
- [32] 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 Applied Physics ,2012 ,112(9) : 093305
- [33] O'Connell D ,Zorat R ,Ellingboe A R ,et al. Comparison

of Measurements and Particle-in-Cell Simulations of Ion
Energy Distribution Functions in a Capacitively Coupled

Radio-Frequency Discharge [J]. *Physics Plasmas* 2007 ,
14(10) : 103510