

物理气相沉积中等离子体参数表征的研究进展

曲帅杰^{1,2}, 郭朝乾², 代明江², 杨昭¹,
林松盛², 王迪², 田甜^{1,2}, 石倩²

(1.中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083; 2.广东省科学院新材料研究所 现代材料表面工程技术国家工程实验室 广东省现代表面工程技术重点实验室, 广州 510651)

摘要: 物理气相沉积作为制备表面防护薄膜的重要方法, 一直是表面薄膜领域研究重点, 而物理气相沉积中等离子体作为直接影响薄膜性能的关键因素, 其参数的表征对优化沉积工艺和提高薄膜性能具有重要指导意义。概述了常用物理气相沉积方法及其发展, 包括电弧离子镀、磁控溅射和电弧磁控复合技术的原理及发展历程。归纳了目前生产中常用的等离子体参数表征方法——Langmuir 探针法、汤姆逊散射法、微波干涉法和发射光谱法, 阐明了这些表征方法诊断等离子体参数的原理, 分析了不同表征方法的优缺点和存在的主要问题, 并对常用物理气相沉积中等离子体参数表征相关研究的发展和现状作了综合论述和总结, 分别整理了电弧离子镀和磁控溅射中等离子体参数诊断的发展历程和近期研究。两种物理气相沉积方法最常用的等离子体参数表征方法都是 Langmuir 探针法和发射光谱法, 早期的研究侧重于探索等离子体瞬态参数和薄膜结构性能的关系。随着现代技术的进步, 早期诊断方法不断与新技术融合, 研究方向也逐渐偏向于研究等离子体参数的时间变化和优化薄膜工艺、性能评价方法。最后分析了当前物理气相沉积中等离子体参数表征存在的问题和不足, 展望了等离子体参数未来的研究趋势。

关键词: 物理气相沉积; 薄膜; 等离子体参数; 电弧离子镀; 磁控溅射; 发射光谱法; Langmuir 探针

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)10-0140-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.10.012

Research Progress of Plasma Parameter Characterization in Physical Vapor Deposition

QU Shuai-jie^{1,2}, GUO Chao-qian², DAI Ming-jiang², YANG Zhao¹,
LIN Song-sheng², WANG Di², TIAN Tian^{1,2}, SHI Qian²

(1.School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2.Guangdong Provincial Key Laboratory of Modern Surface Engineering Technology, National Engineering Laboratory of Modern Surface Engineering Technology, Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510651, China)

收稿日期: 2020-12-10; 修订日期: 2021-02-24

Received: 2020-12-10; Revised: 2021-02-24

基金项目: 广东特支计划项目 (2019BT02C629); 广东省自然科学基金 (2016A030312015, 2018A030313660); 广州市科技项目 (202007020008, 201904010261, 201807010027)

Fund: Guangdong Special Support Program (2019BT02C629), Natural Science Foundation of Guangdong Province (2016A030312015, 2018A030313660), Science and Technology Program of Guangzhou (202007020008, 201904010261, 201807010027)

作者简介: 曲帅杰 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电弧离子镀制备硬质涂层。

Biography: QU Shuai-jie (1996—), Male, Master degree candidate, Research focus: preparation of hard coating by arc ion plating.

通讯作者: 郭朝乾 (1990—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为薄膜及涂层材料。

Corresponding author: GUO Chao-qian (1990—), Male, Ph. D., Senior engineer, Research focus: film and coating materials.

引文格式: 曲帅杰, 郭朝乾, 代明江, 等. 物理气相沉积中等离子体参数表征的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(10): 140-146.

QU Shuai-jie, GUO Chao-qian, DAI Ming-jiang, et al. Research progress of plasma parameter characterization in physical vapor deposition [J]. Surface technology, 2021, 50(10): 140-146.

ABSTRACT: As an important method for preparing surface protective films, physical vapor deposition is always the research focus in the field of surface films. Plasma in physical vapor deposition is a key factor that directly affects the performance of films. The characterization of its parameters has important guiding significance for optimizing the deposition process and improving the performance of films. The paper summaries the common physical vapor deposition methods and their development, including the principle and development process of arc ion plating, magnetron sputtering and arc magnetic control composite technology and generalizes the commonly used characterization methods of plasma parameters in current production, including Langmuir probe method, Thomson scattering method, microwave interference method and emission spectrum method, of which the principle for diagnosing plasma parameters is expounded and the advantages and disadvantages and the main problems are analyzed. The development and current situation of plasma parameter characterization in common physical vapor deposition are summarized, and the development and recent research of plasma parameter diagnosis in arc ion plating and magnetron sputtering are sorted out. Langmuir probe method and the emission spectrum method are the most commonly used methods for plasma parameter characterization of physical vapor deposition. Early studies focused on exploring the relationship between plasma transient parameters and the structural properties of thin films.. With the progress of modern technology, the early diagnosis methods are constantly integrated with new technologies, and the research direction is also gradually inclined to study the time variation of plasma parameters and optimizes thin-film processing and performance evaluation methods. Finally, the paper analyzes problems and shortcomings of plasma parameters characterization in physical vapor deposition and prospects the future research trend of plasma parameters.

KEY WORDS: physical vapor deposition; thin film; plasma parameters; arc ion plating; magnetron sputtering; emission spectroscopy; Langmuir probe

科技的飞速发展和工业生产需求的不断提高,对材料的服役性能有了更高的要求,在材料表面沉积高性能薄膜是提高材料性能、延长服役时间的重要途径,近年来受到广泛关注。作为真空镀膜技术中两大类之一的物理气相沉积技术(Physical Vapor Deposition, PVD),是制备硬质薄膜的常用技术,并随着近年来薄膜技术和材料的飞速发展日趋完善。根据沉积机制的不同,物理气相沉积主要分为离子镀膜(Ion Plating)、真空蒸镀(Vapor Evaporation)、真空溅射镀膜(Vapor Sputtering)等。在此基础上,还出现了离子束增强沉积(Ion-beam Enhanced Deposition)等辅助沉积技术,进一步提高了薄膜质量^[1-2]。电弧离子镀和磁控溅射是目前常用的两种薄膜制备方法。

电弧离子镀是基于电弧弧光放电原理,在一定真空度条件下,通过电弧产生的高热量将靶材蒸发,与气体粒子碰撞离化为高能粒子,并在基体上沉积成膜的镀膜方法^[3],具有高沉积速率、高离化率等优点^[4-5]。但由于电弧能量过高,靶材中蒸发出的大液滴也混在等离子体中沉积成膜,导致薄膜均匀性降低,极大地降低了薄膜质量^[6-7]。

磁控溅射技术是另一种典型的物理气相沉积技术,通过施加一定电场使气体产生辉光放电,在磁场作用下促进气体电离,撞击靶材表面,使靶材表面原子脱离靶材,并部分电离,通过在基体施加负偏压使电离粒子沉积到基体表面^[8]。其优点主要是制备的薄膜光滑细腻,不存在大颗粒污染,成膜质量高、缺陷少等,但靶材离化率较低,薄膜沉积速率低^[9]。

21 世纪以来,电弧离子镀与磁控溅射复合工艺得到迅速发展。这种复合沉积方法有效结合了电弧离

子镀与磁控溅射技术的优点,制备的薄膜质量和性能得到进一步提高。Qiaoqin Guo 等^[10]用电弧离子镀与磁控溅射结合的技术,以较高的沉积速率在轴瓦零件上沉积了 $C_p/AlSn$ 自润滑薄膜,极大地改善了轴瓦摩擦磨损性能。Nan-Hung Chen 等^[11]结合电弧与磁控溅射,在固定氮气流中合成了 $Cu-TiN$ 薄膜,既有良好保护性,又有可调控的颜色。Li Shipeng 等^[12]采用电弧离子镀与中频磁控溅射结合,用一个 Ti 电弧靶和两个 Si 磁控靶在硬质合金上沉积了 $TiSiN$ 薄膜,在适当氮气流下,具有较强的抗摩擦磨损性能。

物理气相沉积薄膜过程中主要通过调节靶材电流、基体偏压、气体分压等工艺参数,来改变薄膜沉积过程中等离子体状态,进而调控薄膜的成分及结构。探索制备工艺、等离子体状态及薄膜结构与性能三者的关系,对高性能薄膜材料的制备具有重要的指导意义。本文归纳总结了常用的等离子体参数表征手段和近年来物理气相沉积中的等离子体参数表征研究现状及存在的问题。

1 常用等离子体表征手段

等离子体作为物质第四态,对其在相关实验中所处状态的研究一直是等离子体领域的重要内容。常用的等离子体诊断方法有微波干涉法^[13]、Langmuir 探针法^[14]、汤姆逊散射法^[15]和发射光谱法^[16]。

1.1 微波干涉法

微波干涉法的原理是:测量入射波和选取的参考波在等离子体传播过程中的相位差,以此获取待测等

离子体的介电常数,再结合公式分析计算,获得等离子体的电子密度^[17]。常用的单路微波干涉仪原理如图 1 所示^[18],反射调速管产生的微波信号经过波长计后,由定向耦合器分为两路,一路经过喇叭天线和等离子体管,另一路经过移相器和衰减器,两路最后在微波功率计上显示结果。

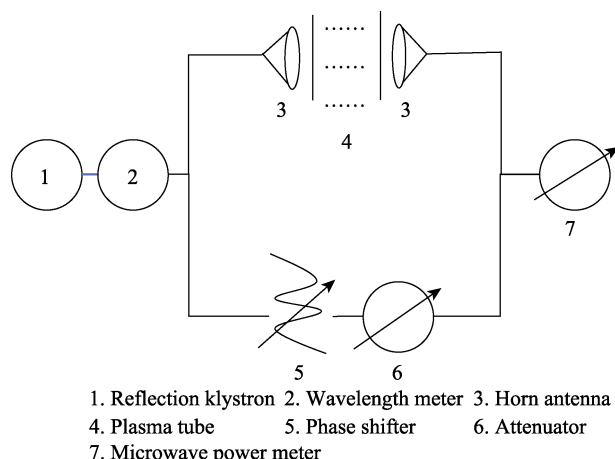


图 1 单路微波干涉仪原理示意图^[18]

Fig.1 Schematic diagram of single-channel microwave interferometer^[18]

单路微波干涉仪的主要作用是求得参考微波在等离子体传播过程中的相位差。在等离子体支路通等离子体和不通等离子体时分别调节移相器和衰减器,使微波功率计显示极小值,计算移相器两次示数之差,即为相位差 $\Delta\varphi_p$ 。由公式 (1) 计算电子密度。

$$n(x) = \frac{m_e \cdot c}{e^2} \cdot \frac{f \cdot \Delta\varphi_p}{d} \quad (1)$$

式中: c 为光速; m_e 为电子质量; e 为电子电量; f 为电磁波频率; d 为等离子体厚度^[19]。

早在 20 世纪 80 年代,我国就有学者通过微波干涉法来诊断等离子体。1985 年,清华大学就利用微波干涉法进行了等离子体密度的测量,并与探针诊断结果相比较,两者结果处于同一数量级,吻合程度良好^[20]。近年来,微波干涉法与其他新技术结合,对优化等离子体相关工艺作用巨大。J. Faltýnek 等^[21]利用微波干涉法和光学发射光谱法 (OES),研究了功率调制等离子体射流中等离子体密度的时间演化规律,并比较了两种方法获得的结果,发现两种方法在定性与定量上都表现出一定周期内的演化相似性,并以此对等离子体灯丝周围非平面电磁波传播进行改进。从理论到应用于工艺优化,证明了微波干涉法已经逐渐发展成为一种比较成熟的等离子体诊断方法。其最大的优点在于非接触,不会改变等离子体状态;缺点是安装空间有限,导致微波干涉法通道有限,诊断等离子体参数的空间范围也有限,大大限制了微波干涉法的应用范围。

1.2 Langmuir 探针法

20 世纪 20 年代提出的 Langmuir 探针法是最早最基本的等离子体诊断方法。最基本的单探针法原理是:在等离子体中插入一根施加一定电压的微小电极,与等离子体形成电位差,探针收集的电流会逐渐变化,由此测得探针上的伏安特性曲线,对伏安特性曲线上的信息提取转化,得到电子密度和电子温度等等离子体参数^[22],如图 2 所示^[23]。

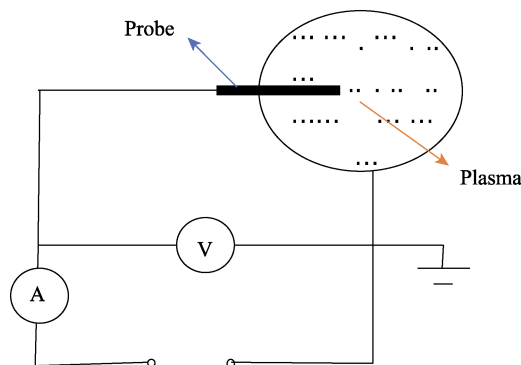


图 2 Langmuir 探针工作示意图^[23]

Fig.2 Working diagram of Langmuir probe^[23]

获得等离子体伏安特性曲线后,对电流取对数,结合最小二乘法拟合曲线,得到过渡区内 $\ln I_p$ 和 V_p 的线性关系,线性关系中直线部分斜率的倒数就是等离子体电子温度,通常应用公式 (2) 计算。

$$KT_e = \frac{e(V_{p1} - V_{p2})}{\ln I_{p1} - \ln I_{p2}} \quad (2)$$

式中: K 为玻尔兹曼常数; T_e 为电子温度; I_p 为探针电流; V_p 为探针电位; e 为电子量。

由于等离子体总体呈电中性,一般认为电子密度与离子密度的值近似相等,并由公式 (3)^[24-25] 计算得到等离子密度。

$$n_{e0} = n_{i0} = 3.7 \times 10^8 \cdot \frac{I_{e0}}{A_p \sqrt{KT_e}} \quad (3)$$

式中: n_{e0} 为电子密度; n_{i0} 为离子密度; I_{e0} 为电子饱和电流,其值为伏安特性曲线拐点对应的电流值; A_p 为探针表面积。

Langmuir 探针法作为一种比较成熟的等离子体诊断方法,具有仪器设备简单、诊断信息全面等优点^[26]。但传统 Langmuir 探针系统为单一探针,由于其吸收电子收集信息的工作原理,易导致探针表面生成杂质鞘层,影响诊断。由此出现了双探针、发射探针^[27]等多种诊断方法。但 Langmuir 探针在使用过程中有两个关键问题依然没有得到解决:一是高压下,等离子体的平均自由程比探针尺寸小,导致碰撞频繁,甚至产生二次电子发射,影响诊断^[28];二是探针插入等离子体中工作会干扰被测等离子体。上述两个问题是由 Langmuir 探针原理决定的,在诊断等离子体过程

中不可避免,但在低压等离子体中,Langmuir 探针不失为一种良好的诊断方法。

1.3 汤姆逊散射法

汤姆逊散射法是利用探测光穿过等离子体时导致等离子体内部离子和电子发生次级辐射,产生汤姆逊效应,探测汤姆逊散射信号,根据汤姆逊散射信号与等离子体参数的关系进行诊断的一种方法。散射光经过两次多普勒频移后,与入射光频率不同,满足非相干线性条件,若待测等离子体电子处于热平衡状态,则其分布符合麦克斯韦-玻尔兹曼分布,散射谱线将呈类高斯分布,谱线半高全宽与电子温度平方根 $\sqrt{T_e}$ 成正比,散射谱线强度与等离子体电子密度 n_e 成正比^[29]。因此,等离子体电子温度、电子密度参数可以直接由汤姆逊散射的散射光谱获得。并且,汤姆逊散射法测量范围极广,适用于包括低温和高温在内的多种等离子体诊断^[30-31]。因此,在放电等离子体、聚变等离子体和激光等离子体的诊断中,该法具有非常广泛的应用^[32-34]。汤姆逊散射法存在的最大问题是散射信号微弱,需要多次测量以提高准确度^[35]。这个问题随着近年来高时间分辨探测方法和高能激光设备的开发,已经得到比较好的解决。汤姆逊散射的另一个缺点是探测光会加热被测等离子体,从而影响诊断结果。

1.4 发射光谱法

发射光谱法是近年来逐渐成熟的一种元素定性、定量分析的方法。它是通过测量元素的气态原子或离子激发后发射出的特征谱线,根据特征谱线的波长和强度,判断物质中各粒子所处的状态、组成和含量。在对等离子体参数的诊断中,主要通过捕捉等离子体激发过程中发出的特征光,利用谱线强度和展宽等模拟计算理论光谱^[36],再对照实验获得的光谱,诊断等离子体参数。发射光谱仪主要包括 4 个系统:发生装置、单色器、检测器、读出器件。如图 3^[37]所示,工

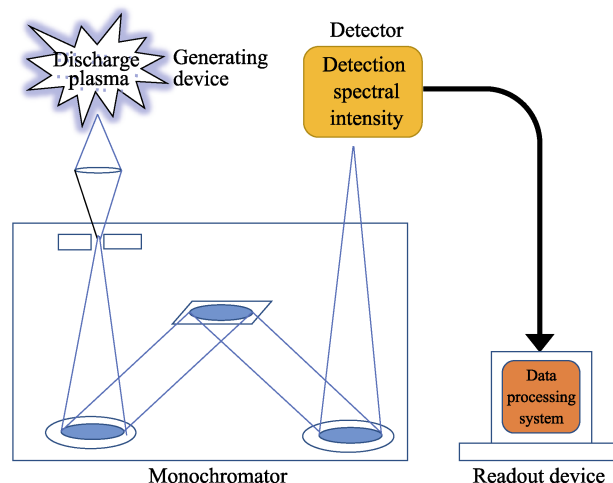


图 3 发射光谱仪系统组成^[37]

Fig.3 System composition of emission spectrometer^[37]

作时由发生装置产生特征光信号,经过光栅等组成的单色器分离处理特征光谱,再由检测器中的光电接收装置测量光谱强度,最后光谱信号进入数据处理系统,结合数学模型与标准光谱比较计算后,由读出器件读出。

发射光谱的分析方法包括定性分析的摄谱法^[38]、半谱半定量的比较黑度法和定量分析的内标法^[39]。发射光谱法的优点在于对金属元素定性分析有很大的优越性,且可以快速对多元素同时测定。其缺点也比较明显:一是元素浓度过大时,准确性较差;二是非金属元素得不到灵敏谱线。

以上 4 种等离子体诊断方法包括接触式和非接触式,原理互不相同,都有各自的优点和局限性。没有任何一种诊断方法可以适用所有等离子体状态参数,需要具体设计实验时,综合多种因素选取。

2 不同物理气相沉积方法的等离子体参数表征进展

物理气相沉积中,等离子体状态参数对成膜质量的影响极大。最常用的物理气相沉积方法中,无论是高离化率的电弧离子镀,还是离化率相对较低的磁控溅射,只要沉积过程中的等离子体状态发生变化,薄膜性能一定会随之产生变化,甚至成膜机制也会发生一定的变化。这为调整工艺提供了理论基础,但另一方面也要求在研究等离子体状态时,尽量选择对等离子体影响较小的表征方法。目前在电弧离子镀和磁控溅射研究中,Langmuir 探针法和发射光谱法是应用较多的两种等离子体诊断方法。

2.1 电弧离子镀中等离子体参数表征进展

20 世纪 70 年代以来,电弧离子镀技术越来越成熟,磁场等的加入使沉积过程中的等离子体状态更加复杂,等离子体状态参数与薄膜性能关系的研究被越来越多的人重视。Junqing Lu 等^[40]采用化学模型,研究了处理室中压强对电弧离子镀等离子体特性的影响,该方法可以预测整个处理室中平均的等离子体特性,对不同工艺条件下整体等离子体特性研究有很大的参考价值。但此方法不能区分等离子体特性的空间变化,且只有理论预测作用,无法实际验证。袁方园等^[41]利用 Langmuir 探针,研究了 Ti 靶电弧离子镀过程中沉积工艺对等离子体状态的影响,并设计了双探针结构,克服了探针被烧损的问题。该实验表明,弧电流和气压直接影响等离子体密度,气压与弧电流增大将引起等离子体密度增大,而电子温度与这两个参数关系不大。这从实验上证明了用双探针方法能够诊断电弧等离子体,对工艺参数优化有很大的指导意义。W. C. Lang 等^[42]设计了适用于电弧离子镀中瞬态等离子体诊断的快速扫描 Langmuir 探针诊断系统,

开发了以集成电路为核心,结合高保真、高功率放大器的大电压宽频率范围的智能锯齿波扫频电源。该功率模块的电源能够精确地产生锯齿波、三角波和正弦波等信号,大大提高了诊断效率,降低了诊断误差。

但由于 Langmuir 探针工作时插入等离子体中会对等离子体产生一定干扰,因此更多人用发射光谱法诊断电弧离子镀过程中的等离子体。利用光学发射光谱法非接触的优点,得到的等离子体参数更接近真实的实验状态。Chi-Jen Chung 等^[43]结合显微结构表征技术和光发射光谱(OES),研究了电弧离子镀(AIP)沉积 TiO₂ 薄膜过程中金红石相成分出现的条件,方便设计更优的工艺,制备高性能的 TiO₂ 薄膜。H. Y. Lee 等^[44]采用光发射光谱,分析了直磁螺线管不同磁场下碳化钨阴极电弧放电过程中等离子体状态的变化,研究了外部参数(如磁场等)对碳化钨-镍薄膜形成及性能的影响,揭示了磁场对硅浓度、等离子体浮动电位和不同元素各激发态含量的影响机制,为磁场相关工艺设计提供了一定的参考价值和数据支撑。Kirsten Bobzin 等^[45]用发射光谱法诊断了电弧离子镀沉积(Cr,Al)N和(Cr,Al)ON薄膜过程中的发射光谱值,并通过纳米压痕、附着力实验等与薄膜性能相联系。发现随着总分压的增大,电离化的 N⁺峰值在 1 Pa 时消失,并随着分压的增大而急剧降低,而激发态 Al 增多。原因在于分压增大,分子自由程减小,碰撞增多,但碰撞后的粒子能量减小。且在 1 Pa 的总压下沉积的(Cr_{0.64}Al_{0.36})N,由于强离子轰击,结合力等性能最佳,说明氮原子电离度与薄膜机械性能密切相关。

2.2 磁控溅射中等离子体参数表征进展

相比于电弧离子镀,磁控溅射镀膜靶材的选择范围更广,且技术成熟更早,对等离子体参数的研究也更充分。早期等离子体的研究主要集中在探索等离子体参数与薄膜性能的关系。早在 1999 年, M. Muta 等^[46]就用二维激光诱导荧光和二维光发射光谱,研究了直流磁控溅射钢锡氧化物靶在氩气氛中的等离子体参数二维空间分布,分别测量了基态和激发态各原子二维空间分布,并分析了氧分压对这两种原子二维空间分布的影响。发现受激氩和钢原子的光发射强度有很强的径向不均匀性,且除阴极附近外,溅射钢原子径向分布在放电中心轴处最大,证明了钢密度是由阴极表面反应决定的。Niklas Hellgren 等^[47]用 Langmuir 探针,研究了非平衡直流磁控溅射沉积 CN_x 径向离子通量,发现了膜结构、表面粗糙度、机械响应强烈依赖沉积颗粒通量与能量,并以此进一步发掘了通过控制工艺参数来控制薄膜结构转变的临界条件。W. M. Posadowski 等^[48]用发射光谱和 Langmuir 探针,研究了在功率密度为 1000 W/cm² 下磁控溅射沉积铜膜,评估了中性粒子组成及不同参数下等离子体温度和电子密度参数,发现了铜离子中起主导作用的

两条谱线,并研究了靶电流和靶基距对沉积过程中铜离子的影响,探索了超高功率下沉积薄膜的可能性。

不难发现,以上研究中的薄膜沉积方法都是常规的直流磁控溅射技术,所用的等离子体参数诊断方法也都是 Langmuir 探针或发射光谱仪。研究等离子体的目的基本都是侧重于发掘等离子体与薄膜某种或某几种性能的关系。但随着磁控溅射技术的发展,反应磁控溅射、脉冲磁控溅射等技术逐渐成熟,等离子体状态参数逐渐复杂化,对它的研究也越来越深入。在发掘薄膜性能与等离子体参数关系的基础上,国内外学者更倾向于结合新方法诊断和研究等离子体状态随时间的变化,来解释沉积过程和薄膜性能的变化。V. A. Semenov 等^[49]用发射光谱法,研究了直流、大功率脉冲和直流与大功率脉冲结合 3 种不同模式下,铜阴极磁控溅射时的等离子体参数,证实了后两种模式的电子密度比直流模式高 2 个数量级,阐明了不同时间段等离子体中何种离子占主导地位。S. Z. Sakhapov 等^[50]采用电学方法,研究了小圆柱阳极磁控溅射等离子体,发现小尺寸附加电极能改变磁控管工作模式。Guangxue Zhou 等^[51]用时间分辨 Langmuir 探针和能量分辨四极质谱仪,研究了铝在双磁控管反应性大功率脉冲磁控溅射离子注入放电中等离子体状态随时间的变化,以时间平均和时间分辨的方式记录了各离子能量分布函数,研究脉冲开启前后等离子体电势、浮动电势和有效电子温度随时间的变化。结果表明,相应能量分布函数中通常存在较低峰和高能尾,揭示了工作气体离子与靶溅射离子到达基体的顺序,并从“梯度漂移”角度解释了双磁控管放电不对称的原因。

除了对现象做出解释外,研究人员还利用等离子体参数的研究对沉积工艺或性能评价方法进行了优化。K. V. Oskomov 等^[52]通过飞行时间质谱仪,测量了石墨大功率脉冲磁控溅射的等离子体组成,以飞行时间预测等离子体成分,由此选择最佳放电电压与电流。R. Sanginés 等^[53]通过发射光谱法,对直流反应磁控溅射沉积氮化硅膜过程中等离子体发射与薄膜折射率的关系进行了深入研究,建立了沉积参数与薄膜折射率的关系方程,获得了由等离子体状态的变化推断氮化硅薄膜折射率的新方法。

3 结语与展望

物理气相沉积过程中的等离子体状态作为影响薄膜性能的重要因素,一直是薄膜研究领域的重点。此前已有较多的相关研究,但总体看,关于物理气相沉积,尤其是电弧离子镀中等离子体参数的研究还不够充分,研究中存在的 2 个关键问题也没有很好地解决:

一是现有的等离子体参数诊断方法往往存在某方面的固有缺陷。虽然有大量学者对此进行了研究,

对已有诊断方法进行优化、设计新结构、开发新技术等,但一些诊断方法中最关键的问题依然很难解决。如 Langmuir 探针对等离子体的接触干扰和探针的高温损坏,发射光谱法在表征多元素时光谱重叠现象严重、难以分辨等。

二是当前还未形成从工艺参数到等离子体状态,进而如何影响薄膜本征性能的较完整的基础理论。

因此,对等离子体状态参数的研究将集中在优化现有等离子体诊断手段、开发新的普适的非接触诊断方法,并结合在线等离子体诊断,建立起系统,完整的制备工艺-等离子体状态-薄膜性能理论。

参考文献:

- [1] 张钧, 赵彦辉. 多弧离子镀技术与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
ZHANG Jun, ZHAO Yan-hui. Multi-arc ion plating technology and application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [2] TITUS D J. Understanding physical vapor deposition coatings[J]. Ceramic industry, 2017, 167(8): 12-16.
- [3] 赵彦辉, 史文博, 刘忠海, 等. 电弧离子镀沉积工艺参数的影响[J]. 真空, 2018, 55(6): 49-59.
ZHAO Yan-hui, SHI Wen-bo, LIU Zhong-hai, et al. Effect of deposition process parameters on arc ion plating[J]. Vacuum, 2018, 55(6): 49-59.
- [4] 王福贞. 阴极电弧离子镀膜技术的进步[J]. 真空与低温, 2020, 26(2): 87-95.
WANG Fu-zhen. Advances in cathode arc ion plating technology[J]. Vacuum and cryogenics, 2020, 26(2): 87-95.
- [5] ZHANG Yong-jian, DAI Jing-jie, BAI Guang-zhu, et al. Microstructure and thermal conductivity of AlN coating on Cu substrate deposited by arc ion plating[J]. Materials chemistry and physics, 2020, 241: 122374.
- [6] 魏永强, 侯军兴, 蒋志强, 等. 电弧离子镀中大颗粒缺陷清除方法的研究现状[J]. 热加工工艺, 2016, 45(6): 28-32.
WEI Yong-qiang, HOU Jun-xing, JIANG Zhi-qiang, et al. Research status of removal methods for macroparticles defects in arc ion plating process[J]. Hot working technology, 2016, 45(6): 28-32.
- [7] ZHAO Biao-chun, ZHAO Xiao-xiao, LIN Liang-liang, et al. Effect of bias voltage on mechanical properties, milling performance and thermal crack propagation of cathodic arc ion-plated TiAlN coatings[J]. Thin solid films, 2020, 708: 138116.
- [8] DENG Yang, CHEN Wang-lin, LI Bing-xin, et al. Physical vapor deposition technology for coated cutting tools: A review[J]. Ceramics international, 2020, 46(11): 18373-18390.
- [9] 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.
LI Fen, ZHU Ying, LI Liu-he, et al. Review on magnetron sputtering technology and its development[J]. Vacuum electronics, 2011(3): 49-54.
- [10] GUO Qiao-qin, GUO Yong-chun, GUO Ding, et al. Microstructure and properties of the $C_p/AlSn$ coatings deposited by magnetron sputtering/multi-arc ion plating[J]. Surface and coatings technology, 2020, 384: 125303.
- [11] CHEN N H, CHUNG C J, CHIANG C C, et al. Antimicrobial copper-containing titanium nitride coatings Co-deposited by arc ion plating/magnetron sputtering for protective and decorative purposes[J]. Surface and coatings technology, 2014, 253: 83-88.
- [12] LI Shi-peng, DENG Jian-xin, YAN Guang-yuan, et al. Effects of nitrogen flowrates on properties of TiSiN coatings deposited by arc ion plating combining with medium-frequency magnetron sputtering[J]. International journal of refractory metals and hard materials, 2014, 42: 108-115.
- [13] 吴莹, 白顺波, 王俊彦, 等. 利用微波诊断等离子体的方法[J]. 光电子技术, 2007, 27(1): 49-54, 72.
WU Ying, BAI Shun-bo, WANG Jun-yan, et al. The methods of plasma diagnosis by microwave[J]. Optoelectronic technology, 2007, 27(1): 49-54, 72.
- [14] BEDICK C R, WOODSIDE C R, BAYLOR R, et al. Combustion plasma electrical conductivity model validation for oxy-fuel MHD applications: Spectroscopic and electrostatic probe studies[J]. Combustion and flame, 2020, 213: 140-155.
- [15] BELYI V V, STRUNNIKOV V M. Diagnostics of plasma inhomogeneity by the Thomson scattering method[J]. Physics of atomic nuclei, 2019, 82(10): 1414-1418.
- [16] ZHANG Ya-ru, MA Ji, NA Xing, et al. A portable and field optical emission spectrometry coupled with microplasma trap for high sensitivity analysis of arsenic and antimony simultaneously[J]. Talanta, 2020, 218: 121161.
- [17] JINDAL A K, OVERZET L, GOECKNER M. Time resolved microwave interferometry measurement of the electron density in a pulsed 1,3-butadiene discharge[J]. Plasma chemistry and plasma processing, 2010, 30(2): 287-297.
- [18] 曹金祥, 俞昌旋, 詹如娟, 等. 微波干涉法测量 EACVD 中等离子体电子密度[J]. 人工晶体学报, 1993, 22(3): 304-307.
CAO Jin-xiang, YU Chang-xuan, ZHAN Ru-juan, et al. Measurement of plasma electron density in EACVD by microwave interference method[J]. Journal of synthetic crystals, 1993, 22(3): 304-307.
- [19] 赵守珍, 谭华铮. 微波干涉仪测量等离子体电子密度[J]. 大学物理, 1987, 6(12): 25-29, 15.
ZHAO Shou-zhen, TAN Hua-zheng. Microwave interferometer measurement of plasma electron density[J]. College physics, 1987, 6(12): 25-29, 15.
- [20] 吴锦发, 张二力, 甄汉生. 微波干涉法测量等离子体密度的实验研究[J]. 微细加工技术, 1985(2): 6-9.

- WU Jin-fa, ZHANG Er-li, ZHEN Han-sheng. Experimental study on the measurement of plasma density by microwave interference method[J]. Microfabrication technology, 1985(2): 6-9.
- [21] FALTÝNEK J, HNILICA J, KUDRLE V. Electron density in amplitude modulated microwave atmospheric plasma jet as determined from microwave interferometry and emission spectroscopy[J]. Plasma sources science and technology, 2016, 26(1): 015010.
- [22] WANG Ya-li, ZHAO Wei, ZHAO Li, et al. Design of electronics system for Langmuir probes on ITER[J]. Fusion engineering and design, 2020, 152: 111429.
- [23] 李京勇, 刘智民, 谢亚红, 等. 射频离子源 Langmuir 双探针设计[J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(5): 484-487.
- LI Jing-yong, LIU Zhi-min, XIE Ya-hong, et al. Design of double Langmuir-probe for radio frequency ion source[J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2017, 37(5): 484-487.
- [24] 张宝芳. 微波等离子体的 Langmuir 探针测量[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2010, 28(4): 521-523.
- ZHANG Bao-fang. Langmuir probe measurement of microwave plasma[J]. Journal of Jiamusi University (natural science edition), 2010, 28(4): 521-523.
- [25] 钱振型. 固体电子学中的等离子体技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 1987: 69-80.
- QIAN Zhen-xing. The plasma chemistry and the solid state electronics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 1987: 69-80.
- [26] RIPAUT-MISGUICH J, et al. Density of a magnetized plasma with a Langmuir probe measurement[J]. Journal de Physique, 1972, 33(8-9): 761-769.
- [27] LI Pei-xuan, HERSHKOWITZ N, WACKERBARTH E, et al. Experimental studies of the difference between plasma potentials measured by Langmuir probes and emissive probes in presheaths[J]. Plasma sources science and technology, 2020, 29(2): 025015.
- [28] 王涛, 张天平, 张海亮. 放电室等离子体诊断 Langmuir 探针设计分析[J]. 真空与低温, 2018, 24(4): 275-278.
- WANG Tao, ZHANG Tian-ping, ZHANG Hai-liang. Analysis and design of Langmuir probe for diagnose of ion thruster discharge plasma[J]. Vacuum and cryogenics, 2018, 24(4): 275-278.
- [29] 臧庆. Nd:YAG 汤姆逊散射诊断系统试验研究[D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2008.
- ZANG Qing. Research of the Nd:YAG Thomson scattering diagnostic system[D]. Hefei: Hefei Institute of Physical Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [30] WARNER K, HIEFTJE G M. Thomson scattering from analytical plasmas[J]. Spectrochimica acta part B: Atomic spectroscopy, 2002, 57(2): 201-241.
- [31] DZIERŻĘGA K, MENDYS A, PELLERIN S, et al. Thomson scattering from laser induced plasma in air[J]. Journal of physics: Conference series, 2010, 227: 012029.
- [32] ZHAO Y, WANG Y, SHI J, et al. Comparison of Terahertz time domain spectroscopy and laser Thomson scattering for electron density measurements in inductively coupled plasma discharges[J]. Journal of instrumentation, 2019, 14(12): C12019.
- [33] 王哲斌. 激光聚变等离子体 Thomson 散射诊断[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
- WANG Zhe-bin. Thomson scattering of laser plasmas in relevance to inertial confinement fusion[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006.
- [34] OTTAVIANO A, SCHINDLER T M, ZHAI K, et al. Characterization and calibration of the Thomson scattering diagnostic suite for the C-2W field-reversed configuration experiment[J]. The review of scientific instruments, 2018, 89(10): 10C120.
- [35] TRAVAILLÉ G, MENDYS A, DZIERZEGA K, et al. Study of heating effects during Thomson scattering in laser induced plasma in air[J]. Contributions to plasma physics, 2011, 51(2-3): 171-175.
- [36] 吴蓉, 李燕, 朱顺官, 等. 等离子体电子温度的发射光谱法诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(4): 731-735.
- WU Rong, LI Yan, ZHU Shun-guan, et al. Emission spectroscopy diagnostics of plasma electron temperature[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2008, 28(4): 731-735.
- [37] 陈新坤, 魏振澄. 原子发射光谱分析原理[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1991.
- CHEN Xin-kun, WEI Zhen-cheng. Principle of atomic emission spectrometry[M]. Tianjin: Tianjin Scientific & Technical Publishers, 1991.
- [38] FLÓRIÁN K, HASSLER J, PLIEŠOVSKÁ N, et al. Direct spectrochemical analysis of solids: A method for characterization of sediments[J]. Microchemical journal, 1996, 54(4): 375-383.
- [39] DUNDAR M S, KAPTAN F, CANER C, et al. Enrichment of some heavy metals with cloud point extraction via 5,7-diiodo-8-hydroxyquinoline ligand and detection by ultrasonic nebulizer- ICP-OES using internal standard method[J]. Atomic spectroscopy, 2018, 39(6): 229-234.
- [40] LU Jun-qing, YOON J H, CHO T Y, et al. Effects of pressure on metal atom transport and plasma properties during arc ion plating of TiAlN[J]. Metals and materials international, 2007, 13(2): 123-128.
- [41] 袁方园, 陆文琪, 林国强. 利用 Langmuir 双探针诊断电弧离子镀等离子体参数[J]. 真空科学与技术学报, 2009, 29(5): 509-512.
- YUAN Fang-yuan, LU Wen-qi, LIN Guo-qiang. Diagnosis of arc ion plating plasma by Langmuir double probes[J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2009, 29(5): 509-512.
- [42] LANG Wen-chang, WANG Xiang-hong, NAN Xiu-rong. Design of fast scanning Langmuir probe diagnostic system suitable for transient arc plasma diagnosis in arc ion plating[J]. Applied mechanics and materials, 2012, 152-154: 1711-1716.