

大功率脉冲磁控溅射的阶段性放电特征*

吴忠振^{1)2)†} 田修波^{2)‡} 李春伟²⁾ Ricky K. Y. Fu³⁾ 潘锋¹⁾ 朱剑豪³⁾

1)(北京大学深圳研究生院新材料学院, 深圳 518055)

2)(哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

3)(香港城市大学物理与材料科学系, 香港 九龙)

(2014年3月14日收到; 2014年3月31日收到修改稿)

本文从放电靶电流出发, 采用一种新的研究方法, 即将靶电流分解为多个代表具体放电特性的特征参数, 全面而系统的研究了不同的工作气压条件下, 靶电流各特征参数随靶电压的增加而进行的演化. 结果发现大功率脉冲磁控溅射技术(HPPMS)放电靶电流在靶电压由低向高增加的过程中, 出现靶电流峰值和平台值的交替变化, 体现出明显的阶段性放电特征, 且不同的放电阶段在不同气压下出现一定的移动, 会在测量范围内出现某些放电阶段的缺失. 本文还通过等离子体发射光谱对HPPMS放电靶前等离子体测量发现五个不同的放电阶段分别主要对应氩原子、铬原子、氩离子、铬离子和氩、铬高价离子的放电, 但不同的放电条件下相邻的阶段会出现一定程度的交叠.

关键词: 大功率脉冲磁控溅射, 放电靶电流, 工作气压, 阶段性放电

PACS: 52.80.-s, 52.25.Jm, 52.70.-m, 52.70.Ds

DOI: 10.7498/aps.63.175201

1 引言

磁控溅射技术作为物理气相沉积(PVD)的主要薄膜制备技术之一, 相对于其他镀膜方法来说, 具有低温沉积、膜厚容易控制、重复性好、溅射成膜的粒子能量适中、不产生大颗粒等优点^[1-3]. 然而常规的直流磁控溅射技术(DCMS)溅射材料离子化率低、粒子可控性差这一缺点, 使其在进一步提高膜基结合力、提高粒子绕射性等方面的应用受到限制^[4,5]. 大功率脉冲磁控溅射技术(HPPMS)正是在这一背景下应运而生, 该技术最早是由Kouznetsov等于1999年提出的^[6]. 其核心思想是: 把传统的直流磁控放电电压(400 V左右)改成低频、高幅值脉冲放电电压(600—1000 V), 利用高能耦合解决传统磁控放电等离子体密度低的问题^[7]. 这样使得靶电流迅速提高, 靶峰值功率密度

可高达1000—3000 W/cm², 溅射材料离子化率可高达90%^[8,9]. 但是, 随着对HPPMS技术的研究和开发, 其放电的复杂性逐渐展现出来, 而放电稳定性和重复性却是决定磁控溅射镀膜质量的好坏和镀膜工艺选择的重要因素.

近十几年来, 越来越多的研究者们投身于HPPMS技术的放电特性及其等离子体特性研究, 其研究方法主要由两种. 一是通过研究放电伏安特性曲线来寻求靶电流的表现形式与放电等离子体之间的对应关系^[10-12]. 比如Anders等^[11]在纯氩气环境下, 采用不同的靶材(Cu, Ti, Nb, C, W, Al和Cr)和复合脉冲研究了大功率磁控溅射的电压-电流-时间关系, 总结了一些特定材料的靶电流随靶电压的变化而产生的演化规律, 并结合自溅射现象和热稀薄效应分析了不同靶电流的形成原因. Magnus等^[13]则使用Ti靶在Ar和N₂的复合气氛下研究了HPPMS放电伏安特性关系, 发现

* 国家自然科学基金(批准号: 51301004, U1330110)、中国博士后科学基金(批准号: 2013M530010)和哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室开放课题研究基金(批准号: AWJ-M13-13)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wuzz@pkusz.edu.cn

‡ 通讯作者. E-mail: xiubotian@163.com

反应性气氛的增加, 大大降低了自溅射程度. 我们在之前的研究中也针对性的对不同材料的靶电流进行测量, 并获得 Ti, Zr, Cr 等一些靶材料的简单放电特性^[14,15]. 另外一种是直接使用等离子体光谱(OES)或质谱对放电等离子体进行测量, 通过分析直接获得放电等离子体的密度、成分、分布等特征^[16-19]. Bohlmark 等^[9]采用 OES 对 Ti 靶的 HPPMS 放电等离子体进行测试, 发现金属 Ti 的离子化率可高达 90% 以上. Ehasarian 等^[20,21]采用 OES 方法对 HPPMS 放电等离子体成分进行了检测, 发现在 Ar 气氛下, 产生的金属离子 Ti^{1+} 浓度为 46%, 高于 DCMS 时的比例 10%. 在 Ar 和 10%N 的混合气氛下, 一些成膜离子如 Ti^{1+} , Ti^{2+} , N^{1+} 含量明显增加, 薄膜形成离子 N^{1+} 的含量最大约占 40%, Ti^{1+} 占 19%, Ar^{1+} 占 19%, 金属离子的含量大约是 DCMS 的 5 倍, 反应性的 N 离子含量也是直流的 4 倍多.

磁控溅射放电行为最直接的体现就是电流-电压 (I - V) 特性, 对于 HPPMS 来说, 其供电电源一般采用脉冲恒压控制, 这样, HPPMS 的靶电流就成为其放电行为的集中体现. 本文同样从 HPPMS 放电靶电流出发, 并将靶电流分解为多个体现放电特性的特征参数, 选择多个低气压和高气压条件, 研究了其随靶电压在初始起辉电压到剧烈放电电压之间变化时的演变规律, 为 HPPMS 伏安特性的研究提供了一种新的研究方法. 利用该方法发现 HPPMS 放电靶电流在由低电压向高电压的增加过程中, 出现靶电流峰值和平台值的交替变化, 体现出明显的阶段性放电特征, 本文重点研究了该阶段性放电特性, 并通过等离子体光谱测量证明了不同的放电阶段所对应的放电形式和产生机理.

2 实 验

试验的主要设备为自行研制的复合脉冲磁控溅射系统^[22], 真空室为直径 400 mm、高 400 mm 的不锈钢双层圆筒, 层间有循环水冷结构, 通有冷却循环水, 真空室内配置 1 cm 厚的铅套来进行隔热和屏蔽辐射. 配备自行研制的复合高功率脉冲磁控溅射电源^[15], 其输出电压为 0—1200 V, 输出脉冲频率 50—200 Hz, 输出脉冲宽度 50—400 μ s. 实验使用 $\Phi 50$ mm $\times$ 4 mm 的纯度为 99.99%Cr 靶, 工作气体为 99.99% 高纯氩气, 背底真空 1×10^{-3} Pa. 靶电流和等离子体发射光谱测试主要考察其在工作气压 (0.3 Pa, 0.5 Pa, 1.0 Pa, 1.5 Pa, 2.0

Pa 和 2.5 Pa) 下随靶电压的逐渐增加所产生的演变为, 靶电压脉冲频率为 100 Hz, 脉冲宽度 200 μ s.

电特性的测试: 在高功率脉冲磁控溅射电源的阳极输出线套一电流传感器, 用以检测高功率脉冲磁控放电电流 I_t , 测量设备采用 Tektronix TDS1012B-SC 示波器, 测试时为了使测试信号清晰, 将靶放电电流放大 10 倍, 并采用示波器自带的平均值平滑技术进行 16 倍平滑. 对放电靶电流波形的分析: 将测得的靶电流信息分解为靶电流平均值、峰值、平台值、平台峰值比、峰值位置和平台开始时间等参数, 如图 1 所示, 其代表意义如下:

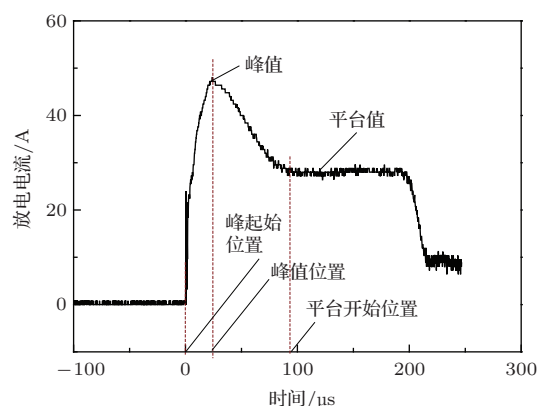


图 1 HPPMS 放电靶电流特征参数示意图

1) 靶电流平均值: 即将一个脉冲内的靶电流值积分后除以靶电流脉宽, 获得一个脉冲内的靶电流平均值, 用以反映系统放电的剧烈程度.

其计算使用公式如下:

$$I_{tm} = \frac{1}{T} \int_0^t I_t(t) dt, \quad (1)$$

式中, I_{tm} 为靶电流平均值, T 为周期, $I_t(t)$ 为瞬时靶电流, t 某一个脉冲时刻.

2) 靶电流峰值: 即脉冲放电开始后, 靶电流所达到的第一个极大值. 一般情况下, 放电开始主要为系统中的气体放电, 随着溅射的进行, 逐渐转变为金属放电或金属、气体共同放电^[23], 而气体离子轰击靶材时二次电子发射系数要远高于金属离子, 故放电开始时靶电流会出现一个明显的峰值, 该峰值主要反应脉冲放电开始时的气体放电状况.

3) 靶电流平台值: 即脉冲放电达到平衡后, 靶电流呈现出一个平台值. 该平台一般反应靶材料自身的溅射参数, 与金属放电状况紧密相关.

4) 靶电流峰值位置: 即靶电流达到峰值的时刻, 在一定程度上反应系统放电的剧烈程度和等离子体中成分变化的速率.

5) 靶电流平台开始时间: 即系统放电达到平衡后, 靶电流呈现出一个平台的开始时间, 它反应了系统等离子体成分稳定的时刻, 在一定程度上反应系统放电的剧烈程度和等离子体中成分变化的速率.

等离子体光谱诊断: 使用荷兰 Avantes 公司生产的发射光谱仪, 型号为: Avaspec-3648 型, 光谱仪是基于 AvaBench-75 光学平台开发的, 采用对称的光路设计, 并带有 3648 像素的 CCD 探测器阵列. AvaSpec-USB2 自带的 USB2 接口的采样速率为每秒 270 个光谱, 其数据传输速度为 3.7 ms, 同时支持模拟信号的输入与输出. AvaSpec-3648-USB2 使用电脑通过 USB 端口对其供电, 其基本技术数据见文献 [24]. 本文将光谱仪安装好, 通过真空装置将探头接入真空室中, 并将探头前段套一内径 3

mm、长 18 cm 的陶瓷管, 以避免光纤探头污染. 将探测端口用钢架固定, 并对准靶材放电区, 然后关闭真空室盖, 开始实验. 当系统起辉后, 调整工艺参数, 并记录不同放电状态的光谱谱线, 以供分析处理.

3 结果与讨论

图 2 为不同的工作气压下 Cr 靶 HPPMS 放电靶电流波形随靶电压的演化的情况. 可以看出, 在工作气压较低时, Cr 靶放电靶电流的峰值和平台值呈现出一定的交替变化特征, 即峰值先增加, 平台值再增加到接近峰值的大小, 然后峰值才进一步增强, 当达到一定程度时, 平台值又开始增加, 直到接近峰值, 最后峰值和平台值几乎同比

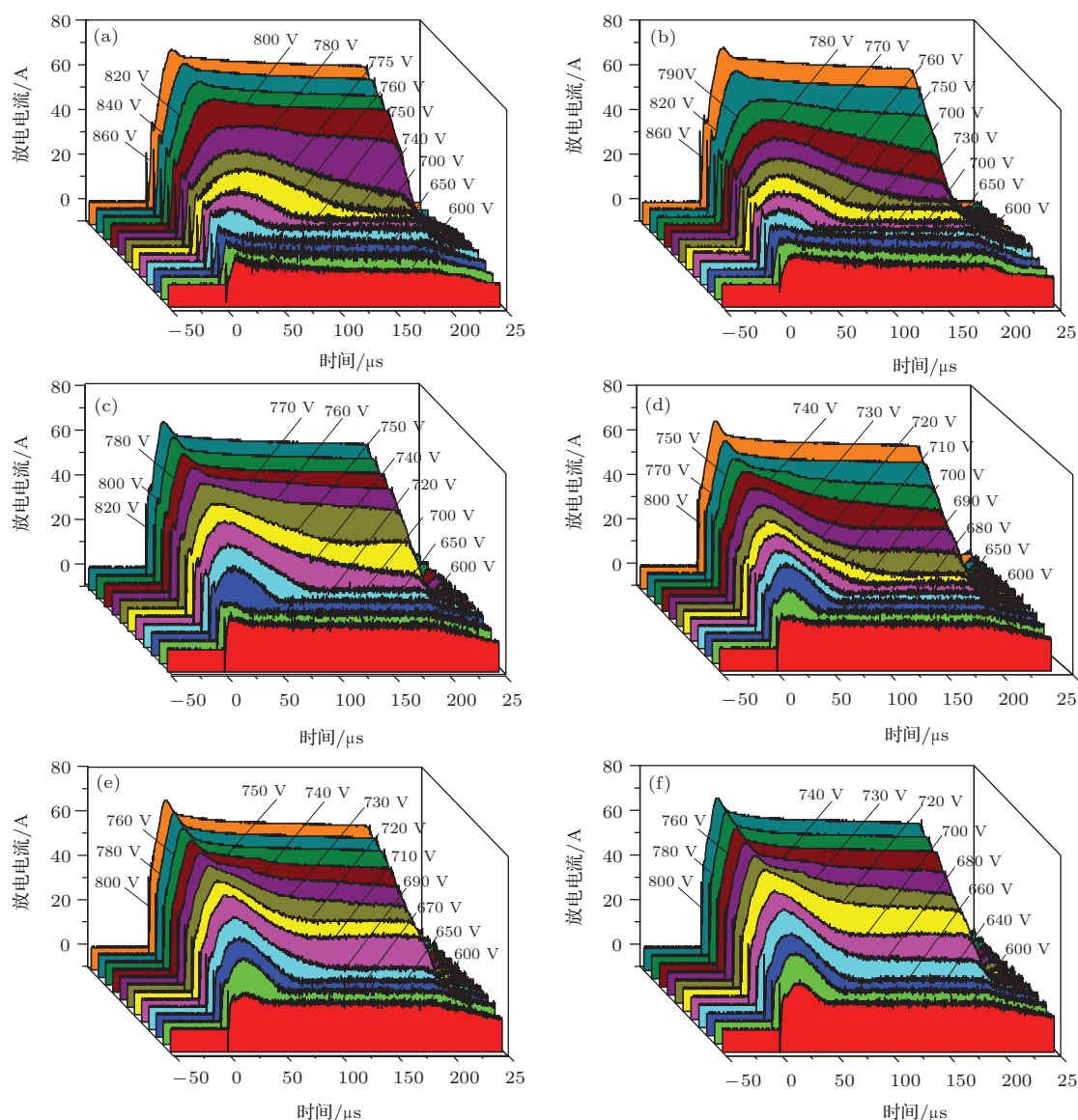


图 2 (网刊彩色) 不同气压下 Cr 靶靶电流波形随靶电压的演变 (a) 0.3 Pa; (b) 0.5 Pa; (c) 1.0 Pa; (d) 1.5 Pa; (e) 2.0 Pa; (f) 2.5 Pa

例增加. 随着靶电压的增加, 放电强度较低的低压放电阶段的交替变化越来越不明显, 很难再被检测到.

根据 HPPMS 放电靶电流峰值和平台值交替变化的特征, 我们可将 HPPMS 放电大致分为五个阶段, 随工作气压的不同有少许阶段的缺失, 尤其是低电压下的低强度放电. 每个阶段划分的示意图如图 3 所示. 第一阶段, 在靶电压比较低时, 放电非常微弱, 靶电流在靶电压脉冲开始后不久出现一个峰值, 该峰值幅值较小, 并随靶电压的增加而增加, 随时间的增加, 靶电流下降, 直到系统达到平衡出现一个平台, 平台的电流值随靶电压变化不大, 直到靶电压脉冲结束后迅速降为零. 第二阶段, 随靶电压的升高, 靶电流前段的峰值大小不再明显变化, 而尾部的平台电流值则随靶电压的增加而快速增加, 直到平台电流值与靶电流峰值数值相当. 第三阶段, 当靶电流平台值达到或接近靶电流峰值后, 继续增加靶电压, 靶电流波形前段将重新形成一个峰值, 并随靶电压的增加快速增加, 此时靶电流后段的平台值也随靶电压有所增加, 但是其增加速度较慢. 第四阶段, 当靶电压达到一定的数值后, 整个脉冲开时间内, 靶电流都增加较快, 尤其是靶电流平台值增加非常明显, 且增加速度明显大于峰值, 此时, 放电非常剧烈, 偶尔会出现打弧. 当靶电流平台值接近或超过峰值后, 若进一步增加靶电压, 放电将进入第五阶段, 该阶段中靶电流峰值和平台值几乎同步增加, 此时, 放电非常不稳定, 经常由于电流过大而打弧.

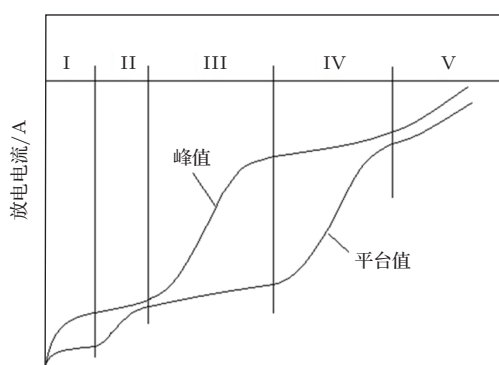


图3 HPPMS 放电阶段划分示意图

Anders 等指出^[11], 放电靶电流的峰值与工作气压有关, 其放电是由气体离子决定的, 紧接的靶电流平台值则取决于靶材料和功率, 与靶材料的自溅射关系密切. 以此推断, 放电过程的第一、三阶段, 靶电流峰值快速增加, 对应着气体放电的剧烈

变化, 而放电的第二、四阶段, 靶电流平台值迅速增加, 说明这两个阶段中自溅射越来越强烈. 前四个放电阶段分别是气体和金属交替增强的, 直到第五阶段才出现气体放电与金属放电同步增强.

图 4 为不同的工作气压下靶电流平均值随靶电压的变化关系, 可以看出, 各种工作气压下, 靶电流平均值随靶电压的变化趋势是一致的, 都随靶电压的增加而单调增加, 且不同的阶段对应着不同的变化速度. 在靶电压较低时, 靶电流平均值随靶电压缓慢上升, 随着放电进入三、四阶段, 由于靶电流峰值和平台值的迅速增加, 靶电流平均值也呈现出一个快速增加阶段, 随着电离逐渐饱和, 靶电流的增加速度又缓慢下来. 这主要与等离子体放电成分有关, 靶电压比较低时, 系统放电非常微弱, 主要以原子放电为主, 随着靶电压的增加, 系统中的原子开始离化, 伴随着放电的剧烈增强, 靶电流也迅速增加, 当等离子体几乎完全电离后, 再进一步增加靶电压, 则开始出现高价电离^[25,26], 但高价离子的产生需要的更高的能量, 靶电流的增加变缓.

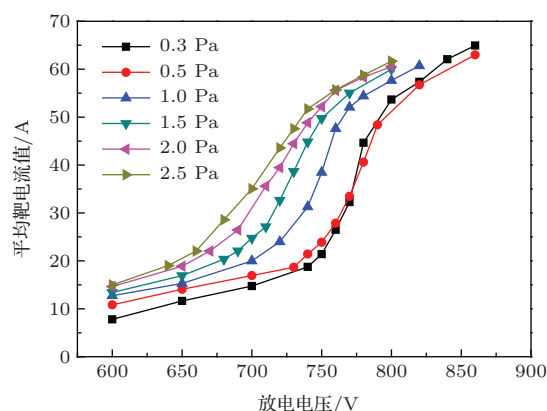


图4 不同气压下平均靶电流值随靶电压的演变

不同的工作气压下, 靶电流平均值随靶电压变化曲线的斜率变化明显, 工作气压较低时, 斜率变化较大, 存在一个斜率较大的靶电压区间, 而在高工作气压时, 斜率变化减小, 变化曲线更接近直线, 斜率较大的靶电压区间也变宽, 说明工作气压的增加延缓了气体放电向金属放电的转变速度. 另外, 随工作气压的增加, 相同的靶电流平均值所需要的靶电压值减小, 曲线向小电压方向移动. 工作气压的增加主要有两个作用, 其一, 增加系统等离子体密度, 即系统中的离子总量增加, 促进放电的进行^[27]; 其二, 由于大量气体离子的堆积, 减慢了等离子体中金属离子对气体离子的取代, 同时增加了

粒子在输运过程中的碰撞, 减慢了粒子的扩散^[28]. 较高的工作气压促进了放电过程, 使得放电更加容易, 故靶电流值随靶电压的变化曲线向小电压方向移动. 同时, 工作气压对离子取代过程和扩散的阻碍作用增加, 使得放电各阶段的演化变缓, 反应在靶电流上, 表现出靶电流值随靶电压的变化曲线逐渐直线化.

图5为不同的工作气压下靶电流峰值随靶电压的变化关系, 可以看出, 靶电流峰值随靶电压的变化趋势与靶电流平均值一致, 同样随靶电压的增加而单调增加, 且不同的变化趋势对应着不同放电阶段. 随工作气压的增加, 靶电流峰值向小电压方向移动, 靶电流峰值随靶电压的变化曲线逐渐直线化, 而且相对于靶电流平均值的变化, 其直线化更加明显, 速度更快, 尤其是在工作气压 2.5 Pa 时, 已经非常接近线性变化, 这说明靶电流峰值对气压的变化要比靶电流平均值更加敏感. 这是由于工作气压增加, 主要是增加放电系统中的气体粒子数量, 而靶电流峰值正是由气体放电决定的, 故其随工作气压的变化更加明显.

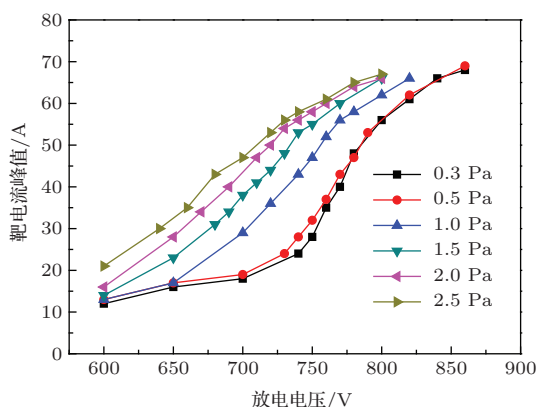


图5 不同气压下靶电流峰值随靶电压的演变

图6为不同的工作气压下靶电流平台值随靶电压的变化关系, 可以看出, 靶电流平台值的变化趋势也随靶电压的增加而单调增加, 且不同的趋势对应着不同放电阶段. 随工作气压的增加, 靶电流平台值向小电压方向移动, 靶电流平台值随靶电压的变化曲线逐渐直线化, 但是相对靶电流平均值其直线化不够明显, 即使在工作气压 2.5 Pa 时, 仍然存在斜率变化较大的靶电压区间, 这说明相对靶电流平均值和峰值, 靶电流平台值对气压并不敏感, 这从另一侧面也验证了靶电流平台值与气体放电关系不大.

为了更清晰的看出靶电流峰值与平台值交替

变化的放电模式, 本文计算了靶电流平台峰值比, 如图7所示, 可以看出, 靶电流平台峰值比在不同的靶放电阶段有不同的变化趋势. 总体来说, 在靶放电第二阶段上升, 第三阶段下降, 第四阶段再次上升直至接近1, 第五阶段靶电流峰值与平台值出现几乎同比例增加的状况, 放电较弱的第一阶段在该图中并未表现出来. 随工作气压的不断加, 整个曲线向小电压方向移动, 在较高的工作气压时, 放电的第二阶段已经偏离电压检测范围. 低气压时, 靶电流平台值与峰值比更容易接近1, 这说明此时金属离子对气体离子的取代非常快, 几乎已经转变为纯自溅射放电^[29], 导致靶电流平台值和峰值几乎一致, 甚至高于峰值. 而高压时, 靶电流平台值与峰值比达到一定值后, 几乎不再变化, 有时还会出现些许下降, 这说明工作气压增加了系统中气体比例, 减慢了金属对气体的取代过程, 导致峰值仍有一定比例的增加.

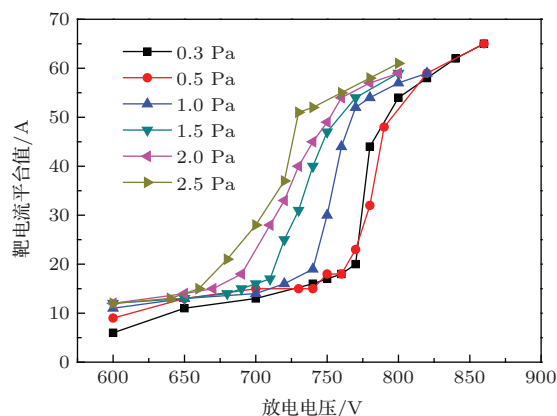


图6 不同气压下靶电流平台值随靶电压的演变

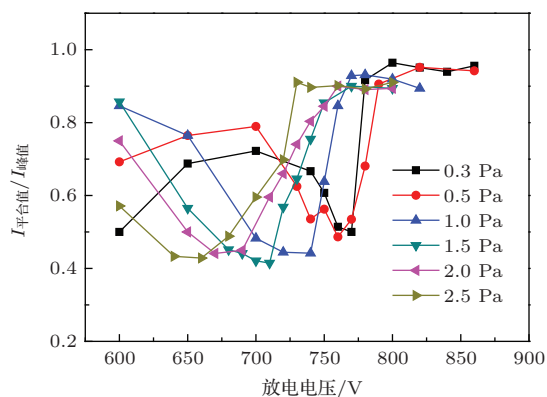


图7 不同气压时靶电流平台峰值比随靶电压的演变

图8为不同的工作气压下靶电流峰值位置随靶电压的变化关系, 可以看出, 靶电流峰位的变化

也表现出阶段性特征, 分别对应靶放电的三、四、五三个阶段, 放电较弱的第一、二阶段在该图中并未表现出来. 一般情况下, 峰值的增强对应着峰位的下降, 而平台值的增强对应着峰位的上升. 在较低的工作气压时, 靶电流峰位的变化非常明显, 峰位值的差异也较大. 随工作气压的不断升高, 靶电流峰位的变化减小, 但趋势仍在. 这同样是由于工作气压的增加延缓了放电各阶段的演化, 气体放电加剧使放电波形更加饱满, 更早的出现峰值. 整个靶电流峰位的变化曲线向低电压方向移动, 在较高的工作气压时, 放电的第三阶段所对应的靶电流峰位的演化已经偏离出实验所检测的靶电压范围, 只剩下变化范围较大的第四、五阶段, 这主要是由于工作气体增加使放电更加容易, 降低了放电阈值, 但是使得自溅射的转变更加困难.

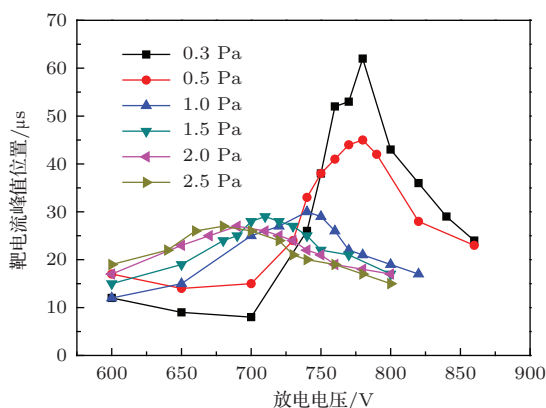


图8 不同气压时靶电流峰位随靶电压的演变

图9为不同的工作气压下靶电流平台开始时间随靶电压的变化关系, 整个脉冲时间内都没有出现平台的情况, 即认为靶电压脉冲结束的时刻为靶电流平台开始时间, 即200 μs. 与峰位相同, 峰值的增强对应着平台开始时间的下降, 而平台值的增强对应着平台开始时间的上升. 可以看出, 靶电流平台开始时间的变化趋势与靶电流峰值位置的变化类似, 低气压时, 靶电流平台开始时间的变化较大, 随气压的不断升高, 变化越来越小, 整个靶电流平台开始时间演化曲线向低电压方向偏移, 并在气压较高时放电的第三阶段偏移出靶电压的实验检测范围.

随着靶电压的增加, 靶电流呈现出阶段性放电特征, 不同的阶段表现出不同的演化规律, 即使是同为气体放电的第一、三阶段或同为金属放电二、四阶段, 其放电电流也有着较大差异, 说明其对应着不同的放电机理. 为探索 HPPMS 随靶电压的增

加发生的不同放电机理, 我们测试了不同气压下, HPPMS 放电等离子体成分随靶电压的增加而发生的变化, 并分别选取四条有代表性的发射光谱 (氩原子 Ar^0 、氩离子 Ar^{1+} 、铬原子 Cr^0 和铬离子 Cr^{1+} , 其对应的谱线波长分别为 811.53 nm, 427.75 nm, 435.14 nm 和 286.67 nm), 绘制了其强度随靶电压的变化曲线, 如图 10 所示.

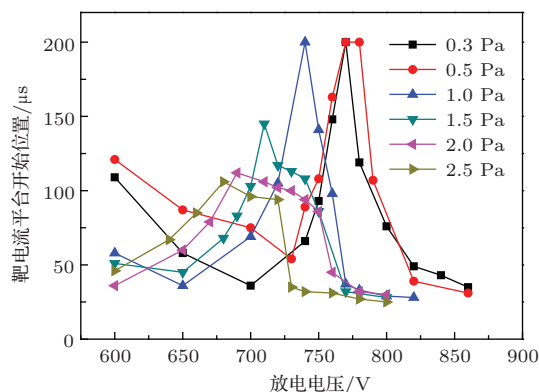
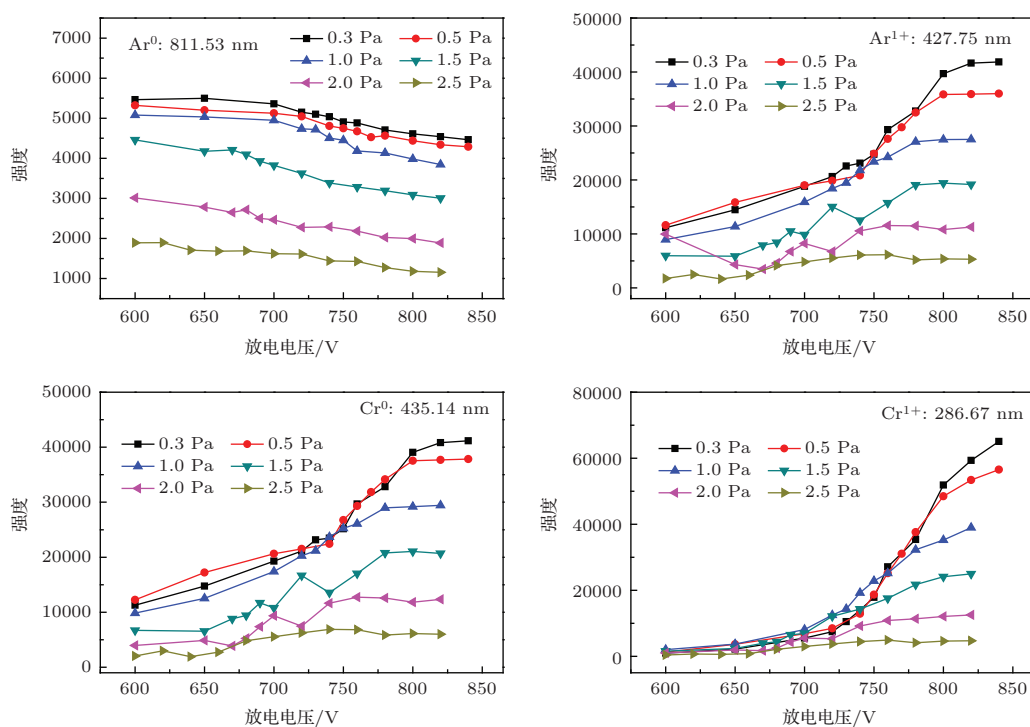


图9 不同气压下靶电流平台开始时间随靶电压的演变

可以看出, 不同气压下的 Ar^0 谱线强度在非常低的靶电压下就具有一定的强度, 且随靶电压的增加几乎不变, 只有非常微弱的下降. 这说明 Ar^0 的放电最容易, 且在更高的靶电压下并没有明显增强, 反而由于靶电压升高带来的靶前等离子体中气体受热变稀效应, 出现稍微下降^[30], 这正好与前面靶电流在较低电压下出现的微弱的峰值相对应. Ar^{1+} 和 Cr^0 谱线的峰值强度都比较高, 说明等离子体中 Ar^{1+} 和 Cr^0 含量都比较大. 在靶电压较低时, Ar^{1+} 和 Cr^0 都具有一定的强度, 说明放电也相对较容易, 随着靶电压的增加, 谱线都单调增加, 并在靶电压大于 700 V 时快速增加, 直到靶电压达到 780 V, 峰值强度的上升速度才缓和下来, 这一靶电压区间正好对应着 HPPMS 放电的第二、三、四阶段, 说明虽然 Ar^{1+} 和 Cr^0 产生较容易, 但其在之后的每个放电阶段都有明显的发生. Cr^{1+} 谱线在较低的靶电压时, 谱线强度非常低, 说明此时等离子体中的 Cr^{1+} 数量很少, 溅射原子几乎不离化, 这种放电类似于常规的直流磁控溅射的放电状况. 当靶电压超过 700 V 时, 谱线强度才开始增加, 尤其是靶电压大于 750 V 时, Cr^{1+} 强度呈几何指数上升, 正好对应于 HPPMS 放电的第四阶段, 说明此时溅射金属也开始剧烈离化, 甚至达到或超过 Ar^{1+} 的光谱强度.

图10 不同气压下 Ar^0 , Ar^{1+} , Cr^0 和 Cr^{1+} 强度随靶电压的变化

由上可知, 第一、二阶段放电非常微弱, 其峰值和平台值的交替增加, 分别对应的等离子体成分主要是激发态的 Ar 和 Cr 原子, 其放电主要有该部分组成; 而第三、四阶段峰值和平台值的快速增加则对应之后 Ar 和 Cr 的剧烈电离, 其等离子体成分主要是电离后的 Ar 和 Cr 离子, 尤其是在第四阶段, 已经有大量的自溅射发生, 其靶电流迅速增加也来自于大量原子的离化, 此时的等离子体中一价离子占绝大比例; 在放电第五阶段, 各种放电几乎达到饱和, 放电很不稳定, 并出现大量的高价离子, 说明其放电电流的增加主要以金属自溅射和高价离子的产生为主。

4 结 论

本文针对 HPPMS 复杂的放电特性, 采用一种新的研究方法, 即将放电靶电流分解为多个代表不同放电特性的特征参数, 研究了不同的工作气压条件下, 靶电流各特征参数随靶电压的增加而进行的演化。结果发现 HPPMS 放电靶电流在由低电压向高电压增加的过程中, 出现靶电流峰值和平台值的交替变化, 体现出明显的阶段性放电特征。此外, 还通过等离子体发射光谱对靶前 HPPMS 放电等离子体测量证明了五个不同的放电阶段分别主要对应了不同种类粒子的放电。这不仅使我们对

HPPMS 放电特征有了进一步的认识, 也对今后使用 HPPMS 进行镀膜时, 不同质量和性能的膜层制备工艺区间的选择有重要意义。

参考文献

- [1] Tian M B 2006 *Thin Film Technologies and Materials* (Beijing: Tsinghua University Press) p445 (in Chinese) [田民波 2006 薄膜技术与薄膜材料 (北京: 清华大学出版社) 第 445 页]
- [2] Yang D, Zhong N, Shang H L, Sun S Y, Li G Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 36801 (in Chinese) [杨铎, 钟宁, 尚海龙, 孙士阳, 李戈扬 2013 物理学报 **62** 36801]
- [3] Wang Y J, Li H X, Ji L, Liu X H, Wu Y X, Zhou H D, Chen J M 2012 *Chin. Phys. B* **21** 016101
- [4] Posadowski W M 1995 *Vacuum* **46** 1017
- [5] Xu J, Ma T C, Lu W Q, Xia Y L, Deng X L 2000 *Chin. Phys. Lett.* **17** 586
- [6] Kouznetsov V, Maca'k K, Schneider J M, Helmersson U, Petrov I 1999 *Surf. Coat. Technol.* **122** 290
- [7] Yukimura K, Ehiasarian A P 2010 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **11** 3005
- [8] Bohlmarm J, Gudmundsson J T, IEEE M, Alami J, Latteman M, Helmersson U 2005 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33** 346
- [9] Bohlmarm J, Alami J, Christou C, Ehiasarian A P, Helmersson U 2005 *J. Vac. Sci. Technol. A* **23** 18
- [10] Mu Z X, Mu X D, Wang C, Jia L, Dong C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 15204 (in Chinese) [牟宗信, 牟晓东, 王春, 贾莉, 董闯 2011 物理学报 **60** 15204]

- [11] Anders A, Andersson J Ehasarian A P 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 113303
- [12] Wang T, Jiang Y D, Yu H, Wu Z M, Zhao H N 2011 *Chin. Phys. B* **20** 038101
- [13] Magnus F, Sveinsson O B, Olafsson S Gudmundsson J T 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 083306
- [14] Duan W Z 2010 *Master Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [段伟赞 2010 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [15] Tian X B, Wu Z Z, Shi J W, Li X P, Gong C Z, Yang S Q 2010 *Chin. Vac.* **47** 44 (in Chinese) [田修波, 吴忠振, 石经纬, 李希平, 巩春志, 杨士勤 2010 真空 **47** 44]
- [16] Du Y Q, Liu W Y, Zhu A M, Li X S, Zhao T L, Liu Y X, Gao F, Xu Y, Wang Y N 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 205208 (in Chinese) [杜永权, 刘文耀, 朱爱民, 李小松, 赵天亮, 刘永新, 高飞, 徐勇, 王友年 2013 物理学报 **62** 205208]
- [17] Li Y P, Liu Z T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5022 (in Chinese) [李阳平, 刘正堂 2009 物理学报 **58** 5022]
- [18] Ma J, Pu Y K 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1527
- [19] Gao F, Li X C, Zhao S X, Wang Y N 2012 *Chin. Phys. B* **21** 075203
- [20] Ehasarian A P, New R, M. unz W-D, Hultman L, Helmersson U, Kouznetsov V 2002 *Vacuum* **65** 147
- [21] Ehasarian A P, Gonzalvo Y A, Whitmore T D 2007 *Plasma Processes Polym.* **4** S309
- [22] Wu Z Z, Tian X B, Duan W Z, Gong C Z, Yang S Q 2010 *Chin. J. Mater. Res.* **24** 561 (in Chinese) [吴忠振, 田修波, 段伟赞, 巩春志, 杨士勤 2010 材料研究学报 **24** 561]
- [23] Oks E, Anders A 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 09330401
- [24] Carsten E, George C, Chan G, Buscher W, Hieftje G M 2008 *Spectrochim. Acta, Part B* **7** 619
- [25] Horwat D, Anders A 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 135210
- [26] Andersson J, Ehasarian A P, Anders A 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 071504
- [27] Benzeggouta D, Hugon M C, Bretagne J, Ganciu M 2009 *Plasma Sources Sci. Technol.* **18** 04502501
- [28] Dunger T, Welzel T, Welzel S, Richter F 2005 *Surf. Coat. Technol.* **200** 1676
- [29] Anders A 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 201501
- [30] Kadlec S 2007 *Plasma Processes Polym.* **4** S419

Phasic discharge characteristics in high power pulsed magnetron sputtering*

Wu Zhong-Zhen^{1)2)†} Tian Xiu-Bo^{2)‡} Li Chun-Wei²⁾ Ricky K. Y. Fu³⁾
Pan Feng¹⁾ Paul K. Chu³⁾

1) (School of Advanced Materials, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

2) (State Key Laboratory of Advanced Welding Production and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

3) (Department of Physics and Materials Science, City University of Hong Kong, Tat Chee Avenue, Kowloon, Hong Kong, China)

(Received 14 March 2014; revised manuscript received 31 March 2014)

Abstract

As one of the burgeoning physical vapor deposition (PVD) techniques, high power pulsed magnetron sputtering (HPPMS), which boasts high ionization rates of sputtered materials and does not suffer from macro-particles, has been investigated extensively recently. Herein, a new method to break down the discharge current into different characteristic components is employed to study the changes of the various parameters as the target voltage is increased at different pressure. Results show a phasic HPPMS discharge when the target voltage is increased, exhibiting an alternate rise of the peak and the platform of the target current. A small change at the discharge stage is observed with increasing pressure, and some stages are missing in some instances. Five discharge stages are found to correspond to the discharge of Ar atoms, Cr atoms, Ar ions, Cr ions, as well as multiply-charged Ar and Cr ions, respectively, according to the optical emission spectra obtained from the HPPMS discharge plasma. Adjacent discharge stages are also found to overlap under certain discharge conditions.

Keywords: high power pulsed magnetron sputtering, discharge target current, gas pressure, phasic discharge

PACS: 52.80.-s, 52.25.Jm, 52.70.-m, 52.70.Ds

DOI: 10.7498/aps.63.175201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51301004, U1330110), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2013M530010), and the State Key Lab of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, China (Grant No. AWJ-M13-13).

† Corresponding author. E-mail: wuzz@pkusz.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: xiubotian@163.com