

筒形高功率脉冲磁控溅射源的开发与放电特性

肖舒 吴忠振 崔岁寒 刘亮亮 郑博聪 林海 傅劲裕 田修波 潘锋 朱剑豪

Cylindric high power impulse magnetron sputtering source and its discharge characteristics

Xiao Shu Wu Zhong-Zhen Cui Sui-Han Liu Liang-Liang Zheng Bo-Cong Lin Hai Ricky K Y Fu
Tian Xiu-Bo Pan Feng Paul K Chu

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 185202 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.185202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.185202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气流对微秒脉冲滑动放电特性的影响

[Effect of flow rate on the characteristics of repetitive microsecond-pulse gliding discharges](#)

物理学报.2015, 64(19): 195204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.195204>

高压耦合高功率脉冲磁控溅射的增强放电效应

[Enhanced discharge of high power pulsed magnetron sputtering coupling with high voltage](#)

物理学报.2014, 63(18): 185207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.185207>

高功率脉冲磁控溅射的阶段性放电特征

[Phasic discharge characteristics in high power pulsed magnetron sputtering](#)

物理学报.2014, 63(17): 175201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.175201>

纳秒脉冲气体放电中逃逸电子束流的研究

[Runaway electron beams in nanosecond-pulse discharges](#)

物理学报.2014, 63(8): 085208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.085208>

筒形高功率脉冲磁控溅射源的开发与放电特性*

肖舒¹⁾ 吴忠振^{1)†} 崔岁寒¹⁾ 刘亮亮¹⁾ 郑博聪¹⁾ 林海¹⁾ 傅劲裕²⁾
田修波¹⁾ 潘锋¹⁾ 朱剑豪²⁾

1) (北京大学深圳研究生院新材料学院, 深圳 518055)

2) (香港城市大学物理与材料科学系, 香港 999077)

(2016年5月26日收到; 2016年6月21日收到修改稿)

高功率脉冲磁控溅射以较高的溅射材料离化率及其所带来的高致密度、高结合力和高综合性能成为物理气相沉积领域的新宠, 然而其沉积速率低、放电不稳定、溅射材料离化率不一等缺点阻碍了其在工业界的推广和应用. 针对高功率脉冲磁控溅射技术固有的缺陷, 我们从靶源出发, 设计了一种筒形溅射源, 将放电限制在筒形溅射源内部, 放电不稳定喷溅出的“金属液滴”和溅射出来但并未离化的溅射材料无法被负电位的引出栅引出而影响薄膜沉积, 只有离化的溅射材料可以引出并沉积形成薄膜, 而电子将在筒形溅射源内部反复振荡, 和未离化的溅射原子剧烈碰撞, 带动进一步离化. 本文通过磁场和放电的模拟发现筒形溅射源内部电子、离子呈花瓣状分布, 8条磁铁均匀分布的结构具有最优的靶材利用率. 据此开发的筒形溅射源可在高功率脉冲磁控溅射条件下正常放电, 其放电靶电流随靶电压变化呈现出高功率脉冲磁控溅射典型的伏安特性特征, 复合电流施加后, 有明显的预离化作用. 溅射“跑道”面积占靶材表面的60%以上, 筒形溅射源中心的离子电流波形与靶电流波形类似, 但相对靶电流延迟约40 μs , 数值约为靶电流的1/10. 结果证明, 筒形溅射源可有效地应用到高功率脉冲磁控溅射放电中, 并成为促进其推广和应用的一种新路径.

关键词: 高功率脉冲磁控溅射, 筒形溅射源, 模拟仿真, 放电特性

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

DOI: 10.7498/aps.65.185202

1 引言

高功率脉冲磁控溅射技术 (high power impulse magnetron sputtering, HiPIMS) 与常规磁控溅射技术相比具有材料离化率高, 沉积粒子能量、平均电荷态高的优势. 该技术于1999年被首次提出后^[1], 引起了真空镀膜领域研究人员的广泛关注, 被认为有望替代传统磁控溅射技术及阴极弧离子镀技术^[2,3], 但随着HiPIMS技术的放电特性及机理研究逐步深入, 其缺陷也逐步凸显. 首先, HiPIMS工作在接近电弧放电的异常辉光放电阶段, 一旦进入电弧放电就会引起“打弧”, 喷溅出“金属液滴”沉积在薄膜表面形成大颗粒^[4]; 其次,

由于不同材料的靶材溅射产额和电离能差异较大, 导致其离化率差异大^[5]; 另外, 由于靶前预鞘层区域存在大小为10%—20%靶电压的电势差, 离化后的溅射材料离子在预鞘层电场作用下被回吸到靶材表面, 导致沉积速率低^[6]. 正是由于其放电不稳定、不同溅射材料离化率差异大、沉积速率低等缺陷, HiPIMS技术在进入工业应用领域的过程中遭遇障碍^[7].

目前, 为了克服HiPIMS技术的缺陷, 业内的研究主要集中在电源改进及靶源磁场优化等方面, 在电源驱动方面, 陆续推出了调制脉冲磁控溅射技术 (modulated pulsed power, MPP)^[8,9] 及HiPIMS与各种电源复合的脉冲驱动技术, 如与直流(DC)^[10]、射频(RF)复合^[11]和中频(MF)复合^[12],

* 国家自然科学基金(批准号: 51301004, U1330110)、深圳科技研究基金(批准号: JCYJ20140903102215536, JCYJ20150828093127698)和香港城市大学应用研究基金(批准号: 9667122)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wuzz@pkusz.edu.cn

以及高脉冲与低脉冲复合等^[13]; 在磁场优化方面, 主要包括磁场强度优化、位置优化及扫描磁场结构优化等^[14,15]. 但这些改进都未能从根本上解决 HiPIMS 技术存在的问题^[16]. 鉴于此, 借鉴阴极弧弯管过滤技术^[17,18] 设计了筒形溅射源附加电场引出的靶源结构, 如图 1 所示, 该结构把放电限制在筒形溅射源内部, 虽无法消除“打弧”, 但可避免“大颗粒”沉积到基片上影响薄膜质量. 未离化的原子将继续保持原方向运动, 最终到达另一边的靶面, 再从靶面溅射出来, 形成反复溅射, 提高了与电子在筒形溅射源内部的碰撞, 有效促进溅射材料的进

一步离化. 此外, 筒形溅射源放电面积大于引出束流的截面积, 其束流密度由于等离子体密度聚焦而大幅增加, 从而加快薄膜沉积^[19].

本文针对筒形溅射源结构, 采用 Comsol Multiphysics 软件对其磁场分布进行优化, 并模拟了其优化结构中电子、离子的运动及分布. 根据模拟结果开发了口径 12 cm 的筒形溅射源原型, 研究了铜靶在该溅射源内的放电特性, 获得了有无复合直流条件下靶电流波形随靶电压变化的演化过程, 同时使用自行搭建的离子电流测试装置, 研究了不同放电条件下靶材内部的离子电流.

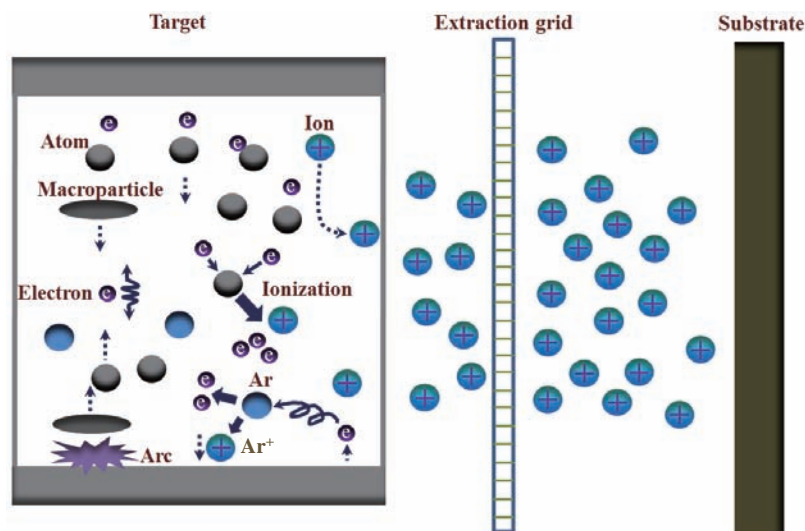


图 1 (网刊彩色) 筒形溅射源示意图

Fig. 1. (color online) Schematic of cylindric sputtering source.

2 实验

2.1 模拟计算

根据筒形溅射源构建原理, 借鉴传统磁控溅射靶源结构特征, 采用 Comsol Multiphysics 软件建立三维筒形溅射源模型并优化磁场分布以提高靶材利用率. 为了后续采用旋转磁极以实现靶材利用率的进一步提高, 采用磁铁沿圆筒周向均匀分布, 即将条形磁铁放置在筒形溅射源的外侧, 相互之间间隔相等, 同时使相邻的磁铁指向筒形溅射源中央对称轴的磁极方向相反, 这样就可以在任意两个相邻磁铁间形成切向(横向)磁场, 将电子约束在靶面附近, 降低起辉电压. 条形磁铁两极的磁感应强度为 400 mT. 为了得到更精确的结果, 考虑了磁铁侧面的磁感应强度, 并假设其为线性变化. 为了保证

靶面横向磁场的强度及优化永磁铁的数量, 分别模拟了 4, 6, 8 和 10 块永磁铁均匀分布的情况.

为了验证筒形溅射源的可行性并预测其放电特性, 对其进行模拟放电研究. 为方便计算, 将阳极设置在筒形溅射源中央并接地. 设定整个装置在 60 °C 的恒温条件下工作, 忽略温度的变化及其不均匀性. 靶材的电压为 -800 V. 仿真所使用的放电气体是 Ar, 气压为 1 Pa. 化学反应模型采用 4 主元, 7 化学反应的 Ar 化学模型^[20]. 初始电子密度设置为 $1 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$, 初始电子平均能量为 4 eV, 二次电子发射系数设置为 0.25.

2.2 放电及伏安特性研究

筒形溅射源的测试在自主设计的真空系统内完成, 真空腔尺寸为 600 mm × 600 mm × 500 mm, 腔体材料为不锈钢. 配备哈尔滨工业大学研制

的复合高功率脉冲磁控溅射电源 [21], 其输出电压为 0—1000 V, 脉冲频率为 50—300 Hz, 脉冲宽度为 50—400 μs . 放电实验采用内径 120 mm, 外径 132 mm, 高 50 mm 的圆筒形铜靶 (纯度为 99.9%), 溅射使用纯度为 99.99% 的高纯氩气, 本底真空为 1×10^{-3} Pa. 靶电压、靶电流、放电辉光及离子电流主要用于考察筒形溅射源在不同条件下 (无直流复合 HiPIMS, 0.2 A 直流复合 HiPIMS) 的放电特性. 放电时靶电压脉冲频率为 100 Hz, 脉冲宽度为 300 μs .

放电特性的测试: 采用 Tektronix TDS1012B-SC 示波器从电源的电压、电流输出接口分别采集靶电压、靶电流数据, 为了得到较清晰的测试信号, 将电压、电流缩小 100 倍, 同时采用示波器的平均值平滑技术进行 64 倍平滑. 为了获得筒形溅射源内部的离子电流, 自主设计、搭建了离子电流测试装置, 如图 2 所示. 采用直径 40 mm, 厚度 0.5 mm 圆铜片作为离子探针接收离子, 使用偏压电源提供 -200 V 偏压, 中间串联 1 Ω , 100 W 电阻, 电阻一端与铜片相连, 偏压电源正极接地, 利用示波器获得电阻两端电位差, 从而计算出离子电流.

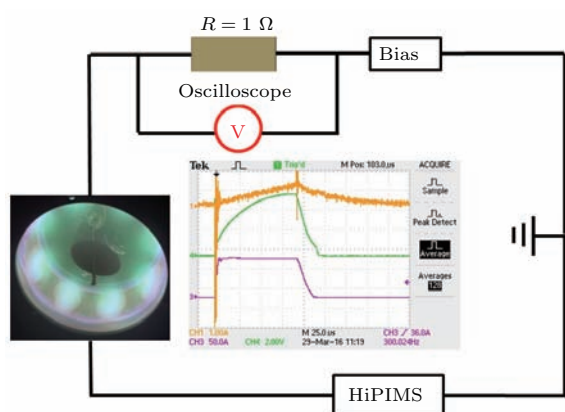


图 2 (网刊彩色) 离子电流测试原理图

Fig. 2. (color online) The principle diagram of ion current test.

3 结果与讨论

3.1 模拟计算

3.1.1 模拟计算

图 3 描述了 4 种磁场分布情况及其横向磁感应强度等值线和靶面横向磁场分布. 根据文献报道, 常规磁控溅射靶面的横向磁场在 20—40 mT

的范围内更有利于束缚电子, 利于放电和溅射 [22], 图 3 中将横向磁场大小处于该范围内的靶面区域使用黑线圈出 (20—40 mT), 表示有效的磁场区域. 结果显示, 四块和六块磁铁均匀分布的条件下, 靶面横向磁场较小且相邻磁铁间的有效磁场区域被分成了两个不连续的区域, 其所占靶面的比例分别为 23.3% 和 39.9%, 如图 3(a) 和图 3(b) 所示, 相邻磁铁间的较大区域在放电时无法被有效地利用, 造成靶材利用率不高. 十块磁铁均匀分布时, 如图 3(d) 所示, 尽管磁铁间的大部分区域处于 20 mT 以上, 但是由于磁铁数量较多, 磁极正上方的靶面面积较大 (此处横向磁场为零), 导致有效磁场区域比例的下降. 此外, 相邻磁铁中央存在一个“蝴蝶型”的区域, 其横向磁场的强度大于 40 mT (内圈黑线内的区域), 这使得横向磁场有效区域面积仅占靶面面积的 39.8%, 同时, 过高的横向磁场还将造成局部放电不均匀. 对比以上三种磁铁分布, 八块磁铁均匀分布的方案较优, 如图 3(c) 所示, 靶面横向磁场 20 mT 等值线包围的区域占整个靶面面积的 60.0% 以上, 且不存在过高的横向磁场分布, 可以更有效地利用靶材, 并保证了筒形溅射源均匀、稳定地放电.

3.1.2 放电模拟

使用 Comsol 软件对筒形溅射源的放电进行模拟计算, 得到该筒形溅射源内部等离子体密度分布, 如图 4 所示 (放电 3 μs 时刻). 阴极施加电压后, 电子从靶表面发射进入筒形溅射源内, 并激发氩气产生放电, 随着模拟时间的延长, 等离子体逐渐向筒形溅射源中心扩展, 并趋于稳定. 稳定后的等离子体中电子和离子的密度分布基本相同, 磁铁间横向磁场最强的区域等离子体密度最高, 达到了 $1.3 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, 如图 4(a) 所示. 图 4(b) 和图 4(c) 表示该时刻的横向和纵向对称截面图的电子密度, 可以看出由于靶外表面为八块永磁铁均匀分布, 因此筒形溅射源内等离子体分布整体呈花瓣形, 形成了八块放电较为强烈的区域. 纵向截面选取的是两个磁铁中间的位置, 其结果与常规阴极放电的等离子体密度分布类似, 最接近靶面的阴极鞘层区为暗区, 等离子体密度较低, 越过靶电压鞘层, 等离子体密度迅速上升达到 $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, 等离子体主要分布在阴极区, 然后随着与阳极距离的缩小而逐渐减小.

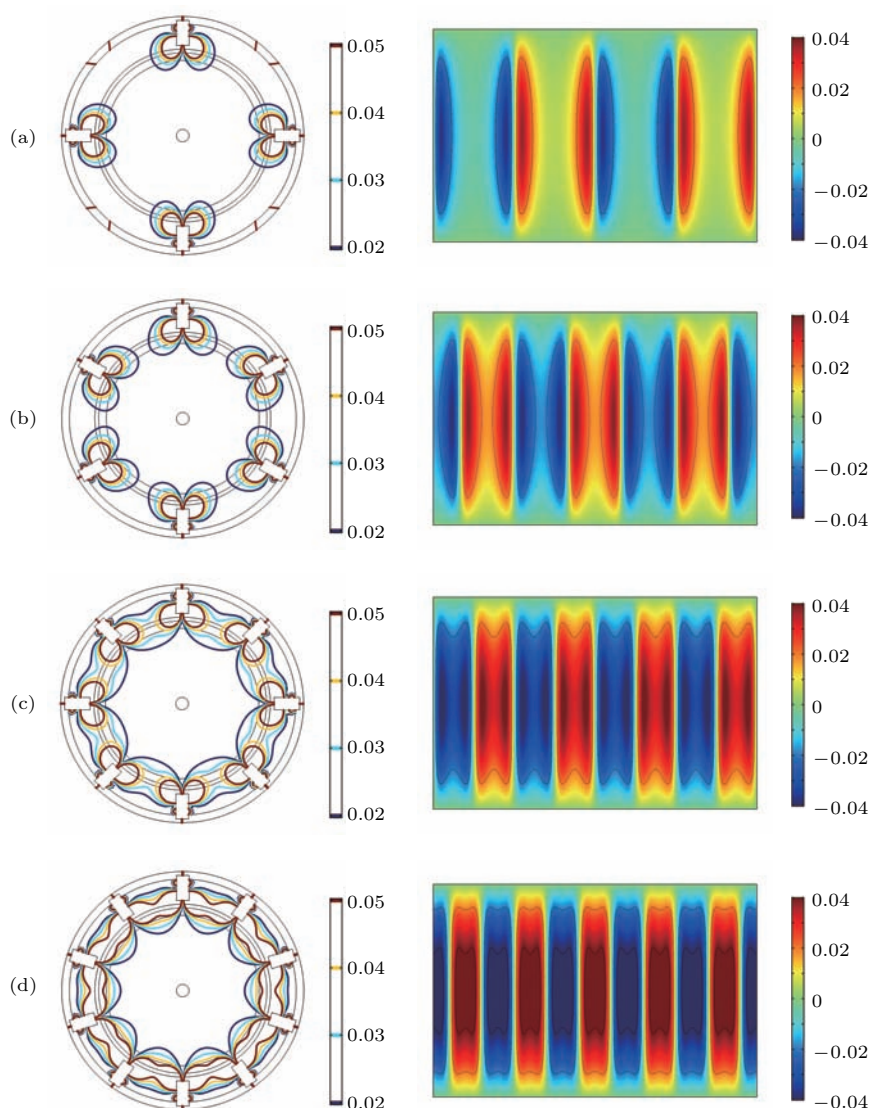


图3 (网刊彩色) 四种磁场分布情况下的横向磁感应强度等值线和靶面横向磁场分布 (a) 四磁铁均匀分布; (b) 六磁铁均匀分布; (c) 八磁铁均匀分布; (d) 十磁铁均匀分布

Fig. 3. (color online) The contour lines of the tangential magnetic intensity and their distributions on the target surface in each case: (a) Four magnets; (b) six magnets; (c) eight magnets; (d) ten magnets.

3.2 筒形溅射源的实现

根据模拟优化的结果设计了筒形溅射源的原型样机, 主要包括五个部分: 控制磁场的实现、放电系统的构建、屏蔽设置、引出及冷却系统设计. 在筒形溅射源结构设计过程中, 采纳了较优的模拟计算结果, 包括靶面磁场分布(即八块磁铁均匀分布)、冷却流道设计、屏蔽罩与源间隙及引出系统布置等. 采用 Solidworks 软件对筒形溅射源进行建模, 并对其结构进行验证, 如图 5(a) 所示. 在结构校核无误情况下, 将筒形溅射源结构加工并组装, 形成实际筒形溅射源样机, 如图 5(b) 所示.

筒形溅射源加工组装完成后, 采用高斯计对其靶材内表面的磁场分布进行测量, 结果显示符合设计需要, 与模拟计算结果一致. 随后对其进行真空条件下的密封性测试, 以保证筒形溅射源在真空系统内正常工作, 结果显示无泄漏. 完成上述基本性能测试后, 对筒形溅射源放电结构、屏蔽结构进行绝缘测试, 测试满足要求进行放电测试, 放电照片如图 5(c) 所示. 筒形溅射源放电稳定, 辉光呈 8 花瓣状均匀分布, 与模拟结果一致. 分析其刻蚀条纹, 如图 5(d) 所示, 条纹较均匀, 呈圆鼓状, 刻蚀部分占靶面比例约为 60%, 与模拟结果接近.

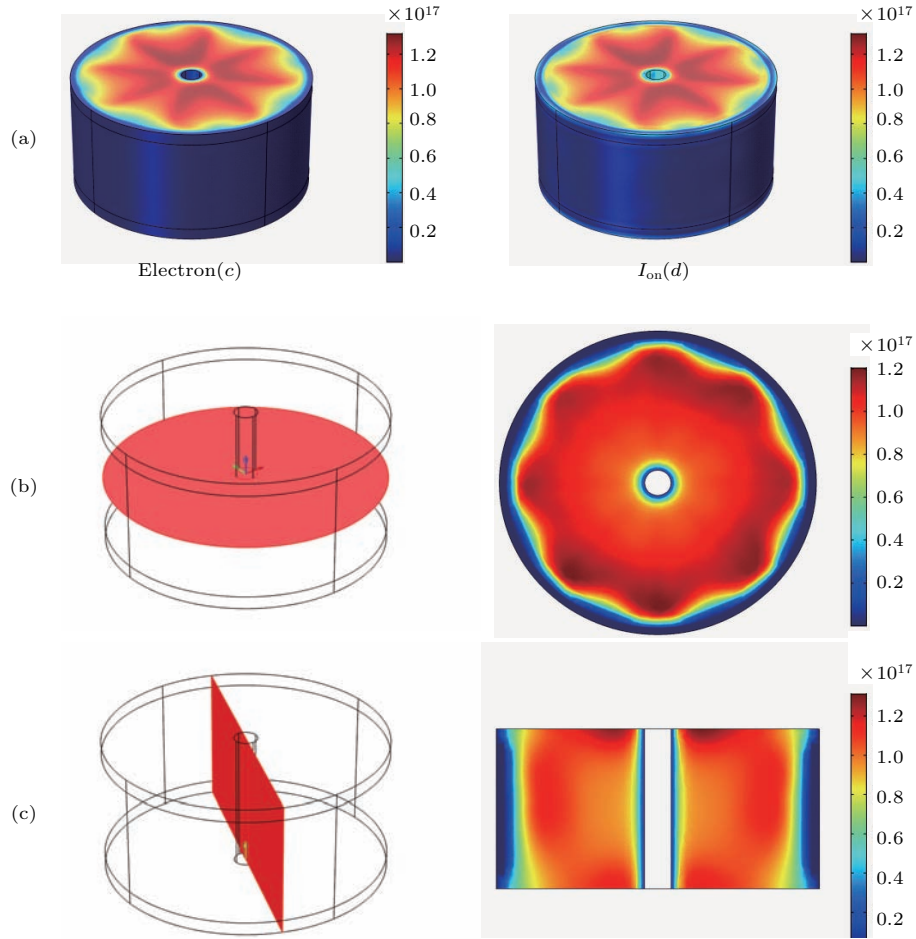


图4 (网刊彩色) 筒形溅射源放电等离子体密度分布 (a) 3D图; (b) 中间横截面; (c) 磁铁间纵截面

Fig. 4. (color online) The distribution of the plasma in the cylindric sputtering source: (a) 3D images; (b) middle cross-section of the sputtering source; (c) lengthwise section of the sputtering source between two magnets.

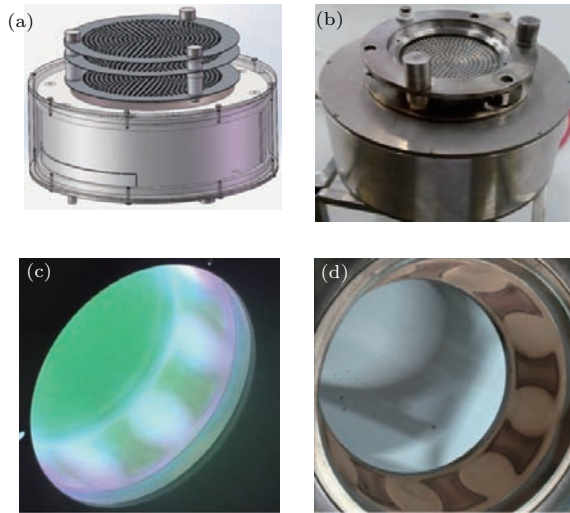


图5 (网刊彩色) 筒形溅射源设计及放电照片 (a) 设计图; (b) 原型机; (c) 铜靶放电; (d) 靶材刻蚀条纹

Fig. 5. (color online) The development of cylindric sputtering source and discharging images: (a) Design drawing; (b) prototype; (c) discharging picture of Cu; (d) discharge "racetrack" of target.

3.3 放电及伏安特性

图6为无复合直流与复合直流0.2 A时的HiP-IMS放电辉光照片, 其中深红色为Ar电离的特征色, 绿色为Cu电离的特征色. 根据放电辉光强度可以看出, 八个磁铁相间的区域等离子体放电强度最大、密度最高, 向筒形溅射源中心逐渐减弱, 与模拟结果一致. 无直流复合时, 随着电压增加辉光颜色从深红色到绿色变化明显, 如图6(a)所示. 辉光颜色变化表明, 当电压较低时筒形溅射源内部主要以Ar电离为主, Cu电离较弱, 随着靶电压的增加Cu电离速度加快, 电压高于850 V后靶面附近辉光为绿色, Ar电离基本被覆盖, 此时Cu电离占主导地位. 如图6(b)所示, 有直流复合时, HiPIMS放电辉光也随着电压增加颜色由浅红色到绿色, 反映了从Ar电离到Cu电离的演化过程. 相对同样电压条件下有直流复合的HiPIMS放电辉光, 无直流复合情况下溅射更加强烈, 辉光颜色较深.

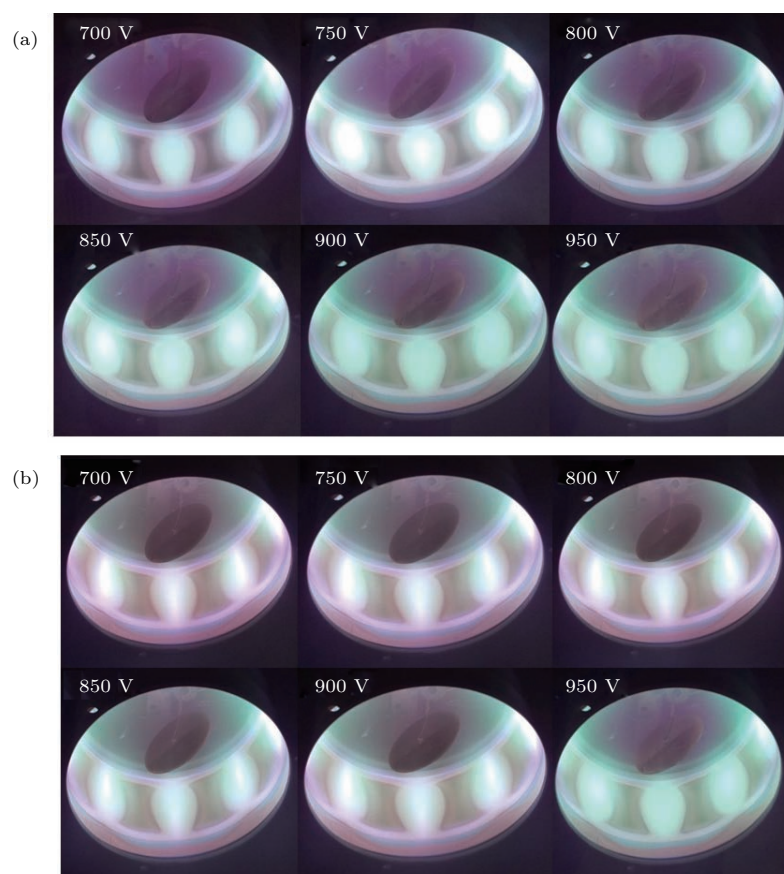


图6 (网刊彩色) 不同放电条件下的辉光照片 (a) 无直流复合; (b) 直流 0.2 A

Fig. 6. (color online) The HiPIMS glow images at different discharge conditions: (a) No direct current; (b) direct current 0.2 A.

图7为筒形溅射源在不同放电条件下的靶电压和靶电流波形曲线. 无直流复合的情况下, HiPIMS放电靶电压较低(≤ 700 V)时, 施加电压后, 靶电流缓慢升高并在约100 μs 后达到一个平台, 其电流值为3.2 A, 该平台一直维持到脉冲结束才快速下降至零. 此时电流无明显峰值, 放电非常微弱, 对应于HiPIMS放电的类直流放电阶段^[23]. 在靶电压值升高后, 靶电流在脉冲放电开始后80—100 μs 出现一个峰值, 随后靶电流下降并形成平台, 直到脉冲结束迅速下降为零. 随靶电压的持续增加, 峰值形成时间逐渐缩短, 其电流值大小快速上升, 其增幅明显大于平台电流值的增幅, 形成典型的HiPIMS放电特征^[24]. 该特征是由HiPIMS放电和溅射过程中金属离子对气体离子的不断取代过程和气体稀薄效应(rarefaction effect)造成的, 即放电开始时系统中的气体放电占主导地位, 随着溅射的进行, 逐渐转化为金属放电或者金属、气体共同放电^[25], 而气体离子轰击靶材时二次电子发射系数远大于金属离子, 故峰值产生后靶电流出现一个明显的下降过程^[26]. 靶电流峰值主要反映脉

冲放电开始时的气体放电, 其数值大小对薄膜沉积作用不大^[27], 而靶电流平台是系统等离子体成分稳定后形成的, 其主要反映金属放电, 是靶材本身的溅射和电离参数决定的, 其数值大小与薄膜沉积有直接关系.

复合0.2 A直流后, 随着靶电压的增加, HiPIMS放电靶电流的变化趋势与无直流复合HiPIMS放电类似, 如图7(b)所示. 相对无复合直流的HiPIMS放电, 复合直流后, 相同的靶电压条件下, 其放电靶电流下降, 尤其是靶电流峰值有明显下降. 值得注意的是, 当脉冲结束后无复合直流的HiPIMS靶电流直接下降至零, 该下降过程历时26 μs , 较有直流复合时(13 μs)慢, 主要原因是直流复合条件下, 脉冲结束后直流放电依然能维持体系中的等离子体放电, 而无直流复合条件下脉冲结束后, 阴、阳极间只有稀薄的Ar气体, 阴、阳极间的放电空间可视为一个电阻, 等离子体存在的情况下, 其阻抗明显低于只有Ar的情况, 该阶段电流下降更快, 因此无直流复合HiPIMS在脉冲结束后靶电流下降较有直流复合慢.

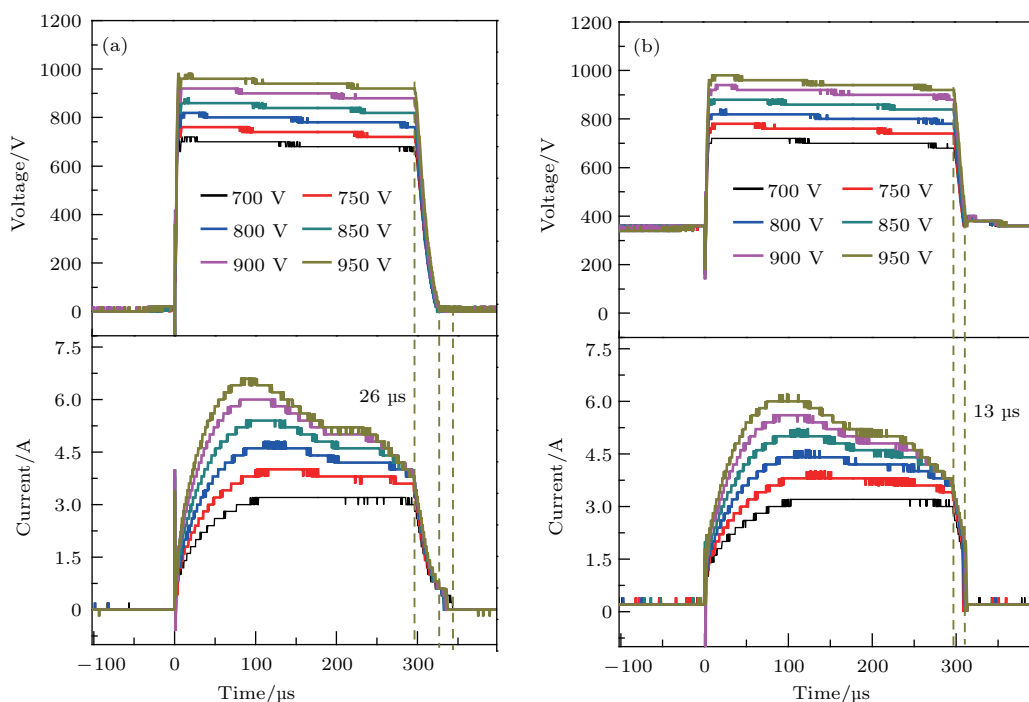


图7 (网刊彩色) 不同放电条件下的靶电流和靶电压波形 (a) 无直流; (b) 直流 0.2 A

Fig. 7. (color online) The target voltage and target current curves under different discharge conditions: (a) No direct current; (b) direct current 0.2 A.

图8为不同放电条件下, 筒形溅射源内部的离子电流随靶电压的演化状况, 离子探针上施加偏压为200 V. 与靶电流类似, 离子电流也随靶电压的启动快速上升, 在靶电压较低时, 离子电流上升到一定数值便达到稳定, 直到脉冲结束. 而靶电压较高时, 离子电流在脉冲施加后迅速增加, 并在120—140 μs后出现峰值, 其数值大小约为靶电流值的1/10, 与以前工作一致^[28], 峰值之后迅速下降形成一个稳定的平台, 直到脉冲结束迅速下降. 与靶电流的波形相比, 离子电流无论是在峰值形成时间, 还是平台形成时间, 均存在约40 μs的延后, 表

明离子由靶面经放电空间漂移到离子探针上所需的时间. 比较有无复合直流的情况, 无直流复合时, 其离子电流的峰值要稍高于有复合直流的情况, 而平台值却略低于有复合直流的情况. 根据靶电流峰值和平台值形成的原因, 离子电流的峰值和平台值也应该是分别与气体离子和金属离子放电相关, 即复合直流的增加有利于金属离子对气体离子的取代过程, 这与复合直流对HiPIMS放电的预离化有关, 同时直流所带来的溅射加速了金属离子对气体离子的取代^[29,30].

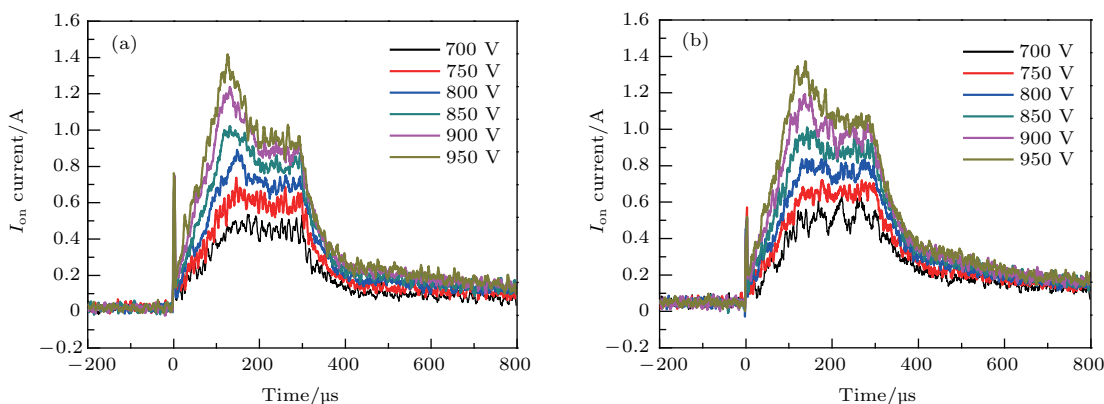


图8 (网刊彩色) 不同放电条件下的离子电流 (a) 无直流; (b) 直流 0.2 A

Fig. 8. (color online) The ion current under different discharge conditions: (a) No direct current; (b) direct current 0.2 A.

4 结 论

为了避免HiPIMS技术放电缺陷对镀膜的影响,推动其产业化进程,本文针对筒形的HiPIMS溅射源进行研发,采用Comsol Multiphysics软件对其磁场结构与放电特性进行模拟计算,获得了优化的磁场分布和放电结构,依据模拟结果设计制作了筒形溅射源原型样机,并对其放电特性进行研究.结果显示,样机满足真空系统的使用要求,靶面横向磁场在20—40 mT范围内的面积占整个靶面积的60%.铜靶放电照片显示的放电强度和分布与模拟结果一致,呈现八个花瓣形的对称分布,其放电靶电流随靶电压变化呈现出HiPIMS典型的伏安特性特征,出现了体现气体放电的峰值和体现金属放电的平台值,复合电流施加后,有明显的预离化作用.离子电流波形与靶电流波形类似,但其峰值和平台值形成时间相对靶电流延迟约40 μs ,离子电流大小约为靶电流的1/10.本文实验结果证明,筒形溅射源设计可以有效地应用到HiPIMS放电中,并可以成为避免HiPIMS放电缺陷对涂层的影响、促进其进一步推广和应用的一种新手段.

参考文献

- [1] Kouznetsov V, Macák K, Schneider J M, Helmersson U, Petrov I 1999 *Surf. Coat. Technol.* **122** 290
- [2] Shimizu T, Villamayor M, Lundin D, Helmersson U 2016 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 065202
- [3] Yang Y, Zhou X, Liu J X, Anders A 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 034101
- [4] Anders A 2011 *Surf. Coat. Technol.* 205 S1
- [5] Wu Z Z, Tian X B, Pan F, Fu R K Y, Chu P K 2014 *Acta Meta Sin.* **10** 1279 (in Chinese) [吴忠振, 田修波, 潘锋, Ricky K Y Fu, 朱剑豪 2014 金属学报 **10** 1279]
- [6] Samuelsson M, Lundin D, Jensen J, Raadu M A, Gudmundsson J T, Helmersson U 2010 *Surf. Coat. Technol.* **205** 591
- [7] Sarakinos K, Alami J, Konstantinidis S 2010 *Surf. Coat. Technol.* **204** 1661
- [8] Wei S, Tian X B, Gong C Z 2013 *Vacuum* **50** 6 (in Chinese) [魏松, 田修波, 巩春志 2013 真空 **50** 6]
- [9] Lin J, Moore J J, Sproul W D, Mishra B, Rees J A, Wu Z 2009 *Surf. Coat. Technol.* **203** 3676
- [10] Qin X, Ke P, Wang A, Kim K H 2013 *Surf. Coat. Technol.* **228** 275
- [11] Holtzer N, Antonin O, Minea T, Marnieros S, Bouchier D 2014 *Surf. Coat. Technol.* **250** 32
- [12] Olejníček J, Hubička Z, Kment Š 2013 *Surf. Coat. Technol.* **232** 376
- [13] Oliveira J C, Fernandes F, Ferreira F, Cavaleiro A 2015 *Surf. Coat. Technol.* **264** 140
- [14] Čapek J, Hála M, Zabeida O, Klemberg-Sapieha J E, Martinu L 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 023301
- [15] Aijaz A, Lundin D, Larsson P, Helmersson U 2010 *Surf. Coat. Technol.* **204** 2165
- [16] Helmersson U 2011 *Proceedings of 11th International Workshop on Plasma Based Ion Implantation & Deposition* Harbin, October 8–12, 2011 p21
- [17] Xu L, Wang S Q 2010 *Vacuum* **47** 79 (in Chinese) [许丽, 王世庆 2010 真空 **47** 79]
- [18] Karpov D A 1997 *Surf. Coat. Technol.* **96** 22
- [19] Wu Z Z, Pan F, Xiao S 2014 *China Patent* 201410268695. 1 2014-06 (in Chinese) [吴忠振, 潘锋, 肖舒 2014 中国专利 201410268695. 1 2014-06]
- [20] Fu Q X 2013 *M. S. Thesis* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [付强新 2013 硕士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [21] Duan W Z 2010 *M. S. 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)]
- [22] Guan K Z, Li Y Q 1986 *Vacuum* **23** 37 (in Chinese) [关奎之, 李云奇 1986 真空 **23** 37]
- [23] Wu Z Z, Tian X B, Pan F, Fu R K Y, Chu P K 2014 *Acta Phys. Sin.* **17** 175201 (in Chinese) [吴忠振, 田修波, 潘锋, Ricky K Y Fu, 朱剑豪 2014 物理学报 **17** 175201]
- [24] Ehiasarian A P 2010 *Pure Appl. Chem.* **82** 1247
- [25] Anders A 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 201501
- [26] Wu Z Z, Xiao S, Ma Z Y, Cui S H, Ji S P, Tian X B, Fu R K Y, Chu P K, Pan F 2015 *AIP Adv.* **5** 097178
- [27] Wu Z Z, Tian X B, Pan F, Fu R K Y, Chu P K 2014 *Acta Phys. Sin.* **18** 185207 (in Chinese) [吴忠振, 田修波, 潘锋, Ricky K Y Fu, 朱剑豪 2014 物理学报 **18** 185207]
- [28] Li C W 2014 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [李春伟 2014 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [29] Luo Q, Yang S, Cooke K E 2013 *Surf. Coat. Technol.* **236** 13
- [30] Paulitsch J, Schenkel M, Zufraß T, Mayrhofer P H, Münz W D 2010 *Thin Solid Films* **518** 5558

Cylindric high power impulse magnetron sputtering source and its discharge characteristics*

Xiao Shu¹⁾ Wu Zhong-Zhen^{1)†} Cui Sui-Han¹⁾ Liu Liang-Liang¹⁾ Zheng Bo-Cong¹⁾
Lin Hai¹⁾ Ricky K Y Fu²⁾ Tian Xiu-Bo¹⁾ Pan Feng¹⁾ Paul K Chu²⁾

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

2) (Department of Physics and Materials Science, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

(Received 26 May 2016; revised manuscript received 21 June 2016)

Abstract

High power impulse magnetron sputtering (HiPIMS) is a popular physical vapor deposition (PVD) technology because of the high ionization of the sputtering materials, large coating density, good adhesion, and other favorable properties. However, this technique suffers some disadvantages such as the small deposition rate induced by the high target potential, the “metallic droplets” produced by the unstable discharge, and different ionizations for different sputtering materials, thereby hampering wider acceptance by the industry. A cylindric HiPIMS source in which the discharge is restricted in the cylinder is described in this paper. By using this source, coatings can be deposited with 100% ions without “metallic droplets” arising from the unstable discharge, and the unionized sputtered atoms cannot be extracted by the extraction grid with negative potential. Electron oscillation and repetitive sputtering of the unionized atoms occur in the cylinder to enhance collision and ionization. Due to the enlarged discharge area by the cylinder internal surface comparing with the area of the ion outlet (end face of the cylinder), the sputtering ions converge from the inwall to the center of the cylinder target and form an enhanced flow to spray out from the source, which will improve the deposition rate. The structure and discharge characteristics of the novel HiPIMS source are investigated by simulation and experiments. Our results indicate that 8 magnets can provide the reasonable magnetic field and the highest target utilization rate. The distributions of electrons and ions in the target each consist of 8 petals in the optimized magnetic structure, and the highest plasma density happens near the target, which is above $1.3 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$. The discharge characteristics confirm that the cylindric sputtering source can be operated under HiPIMS conditions and the evolution of the target currents with target voltage exhibits I - V characteristics typical of HiPIMS. An obvious pre-ionization is observed on the discharge glow and discharge current curves when the extra direct current (DC) is added. The “racetrack” area is about 60.0% of the target surface. The ion current curves are similar to those of the target currents, but a 40 μs delay and about one-tenth current value are observed compared with the target currents. The sputtering is improved by the extra DC, inducing the increased metallic ions and the opposite evolution of gas ions. The results suggest that the cylindric sputtering source can be effectively used to conduct HiPIMS and is a novel way to improve and promote the application of HiPIMS.

Keywords: high power impulse magnetron sputtering, cylindric sputtering source, simulation, discharge characteristics

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

DOI: 10.7498/aps.65.185202

* Project supported by the Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51301004, U1330110), the Science and Technology Research Foundation of Shenzhen, China (Grant Nos. JCYJ20140903102215536, JCYJ20150828093127698), and the Applied Research Foundation of the City University of Hong Kong, China (Grant No. 9667122).

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