

## 复合高功率脉冲磁控溅射 Ti 的放电特性及薄膜制备\*

李小婵<sup>1,2)</sup> 柯培玲<sup>1)</sup> 刘新才<sup>3)</sup> 汪爱英<sup>1)</sup>

1) 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室, 宁波 315201

2) 宁波大学理学院, 宁波 315211

3) 宁波大学材料科学与化学工程学院, 宁波 315211

**摘要** 采用高功率脉冲磁控溅射与直流磁控溅射并联的复合高功率脉冲磁控溅射技术, 研究直流磁控溅射部分耦合直流电流变化对 Ti 靶在 Ar 气氛中放电及等离子体特性的影响. 采用表面轮廓仪、扫描探针显微镜、X 射线衍射与纳米压痕仪对 Ti 薄膜厚度、结构特征以及力学性能进行表征. 结果表明: 耦合直流电流增加, 靶平均功率增加, 脉冲作用期间靶电流降低, 等离子体电子密度增加; 在耦合直流电流为 2.0 A 时, 等离子体电子密度和电子温度获得较大值, 分别为 2.98 V 和 0.93 eV; 耦合直流电流增加, Ti 薄膜沉积速率近似线性增加, 粗糙度增加, 硬度和弹性模量略有降低; 相同靶平均功率时, 采用复合高功率脉冲磁控溅射技术制备 Ti 薄膜与采用传统直流磁控溅射技术相比, 沉积速率相当; 靶平均功率 650 W 时复合高功率脉冲磁控溅射所制 Ti 薄膜比传统直流磁控溅射所制 Ti 薄膜更加光滑, 平均粗糙度降低 1.32 nm, 力学性能更加优异, 硬度提高 2.68 GPa.

**关键词** 复合高功率脉冲磁控溅射, 直流, 放电特性, Ti 薄膜

中图分类号 TB751

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2014)07-0879-07

## DISCHARGE CHARACTERISTICS OF Ti AND FILM PREPARATION USING HYBRID HIGH POWER IMPULSE MAGNETRON SPUTTERING

LI Xiaochan<sup>1,2)</sup>, KE Peiling<sup>1)</sup>, LIU Xincan<sup>3)</sup>, WANG Aiyong<sup>1)</sup>

1) Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201

2) Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo 315211

3) School of Materials Science and Chemical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211

*Correspondent: KE Peiling, associate professor, Tel: (0574)86685036, E-mail: kepl@nimte.ac.cn*

*Supported by National Basic Research Program of China (No.2013CB632302), National Natural Science Foundation of China (No.51375475) and Innovation Team Project of Ningbo (No.2011B81001)*

Manuscript received 2013-11-19, in revised form 2014-03-05

**ABSTRACT** Hybrid high power impulse magnetron sputtering (HIPIMS) is a new-generation HIPIMS technique with a pulse and direct current power supply paralleled connection operation. In this work, the influence of direct current from 0 to 4.0 A supplied by the direct current power is investigated on hybrid HIPIMS Ti discharge characteristics, plasma parameters (plasma potential, electron temperature and electron density) and Ti film properties in an Ar atmosphere. The results show that target voltage and current are characterized by a peak with variation of time in different direct currents. Although the target voltage is barely affected, the target current decreases with increasing the direct current during the pulse turn-on stage. The plasma parameters determined by a Langmuir

\* 国家重点基础研究发展计划项目 2013CB632302, 国家自然科学基金项目 51375475 和宁波市创新团队项目 2011B81001 资助

收到初稿日期: 2013-11-19, 收到修改稿日期: 2014-03-05

作者简介: 李小婵, 女, 1988 年生, 硕士

DOI: 10.3724/SP.J.1037.2013.00744

probe have been significantly influenced by the direct current. Moreover, the deposition rate and average roughness increase while the hardness and elastic modulus have a slight decrease with the variation of direct current from 1.0 to 3.0 A. The samples are selected for comparison with that prepared by conventional direct current magnetron sputtering (DCMS) at the same average target power 650 and 1500 W. The results demonstrate that Ti films using hybrid HIPIMS have a close deposition rate and a superior quality and performance to those prepared using DCMS especially at the low target power 650 W when the direct current is 1.0 A.

**KEY WORDS** hybrid high power impulse magnetron sputtering, direct current, discharge characteristics, Ti film

磁控溅射技术具有低温高效、沉积速率高和易实现薄膜大面积沉积等显著特点<sup>[1]</sup>,在硬质涂层、润滑涂层、耐腐蚀涂层、光电薄膜等领域具有广泛应用前景.然而,在传统磁控溅射技术中,溅射粒子大多以原子态存在,离化率较低,不利于高性能薄膜制备<sup>[2]</sup>.高功率脉冲磁控溅射(high power impulse magnetron sputtering, HIPIMS)以其较高的金属离化率在近几年备受关注<sup>[3]</sup>.通过施加高脉冲电压,峰值功率达1000~3000 W/cm<sup>2</sup>,等离子体密度高达10<sup>19</sup> m<sup>-3</sup>数量级,比传统直流磁控溅射(direct current magnetron sputtering, DCMS)等离子体密度提高2~3个数量级<sup>[4]</sup>,且不含大颗粒.等离子体密度增加,粒子间碰撞时平均自由程缩短,促进溅射金属原子离化,有利于提高薄膜硬度、耐磨性、致密性、折射率、膜基结合力以及靶材利用率<sup>[4,5]</sup>,尤其对复杂形状工件沉积、反应控制、沉积温度降低、沉积材料到不同区域的导向等具有重要意义<sup>[4-6]</sup>.

作为一项新兴技术, HIPIMS 技术研究领域仍存在一些关键难题,如沉积速率过低、大功率电源的研发、放电稳定性、沉积薄膜体系的开发以及等离子体特性研究等<sup>[7]</sup>方面.针对上述问题,研究人员<sup>[8,9]</sup>在实验基础上逐渐改进和完善其溅射系统,同时从理论方面开展关于 HIPIMS 放电特性及等离子体特性深入研究<sup>[10-13]</sup>.将 HIPIMS 与 DCMS 并联同时作用于等离子体负载,通过 DCMS 部分的预离化作用确保脉冲打开之前维持低的等离子体密度<sup>[14,15]</sup>,可以改善 HIPIMS 放电过程中的等离子体稳定性,提高沉积速率.

薄膜沉积过程中,等离子体空间电位( $V_s$ ),电子温度( $T_e$ )和等离子体电子密度( $N_e$ )等微观参数对薄膜质量控制具有决定性作用.然而,实际操作时控制的却是宏观工艺参数,如靶功率、基体偏压、工作气压等,使工艺稳定性无法保障.探求宏观参数如何影响微观参数,对提高沉积薄膜质量、稳定工艺具有很高应用价值.本工作采用 HIPIMS 与 DCMS 并联的复合 HIPIMS 技术,着重考察 DCMS 部分耦合

直流电流变化对 Ti 靶在 Ar 气氛中放电特性和等离子体参数的影响,分析耦合直流电流对 Ti 膜表面形貌、微观结构、力学性能的影响,并将其结果与相同靶平均功率下采用传统 DCMS 技术所得结果对比,其研究结果将为丰富与完善 HIPIMS 技术提供实验支持.

## 1 实验方法

图1为薄膜沉积设备系统示意图,包括复合 HIPIMS 和传统 DCMS 2个磁控溅射源.该复合 HIPIMS 由脉冲电源与直流电源并联<sup>[16,17]</sup>,分别采用恒压和恒流模式同时作用于等离子体负载.薄膜沉积在 Ar 气氛中进行,本底真空度  $3 \times 10^{-3}$  Pa,溅射靶为纯 Ti (质量分数为 99.9%),基体负偏压 150 V,靶基距 17.5 cm,工作气压 0.3 Pa.薄膜沉积前,利用 350 V 负偏压将基体于 Ar 等离子体中刻蚀 30 min.采用复合 HIPIMS 沉积 Ti 薄膜, HIPIMS 部分脉冲电压 600 V,频率 100 Hz,脉冲宽度 200  $\mu$ s; DCMS 部分耦合直流变化范围为 0~4.0 A.采用传统 DCMS 沉积 Ti 薄膜,靶平均功率为 650 和 1500 W,与复合 HIPIMS 技术耦合直流分别为 1.0 和 3.0 A 时靶平均功率相同.

复合 HIPIMS 放电过程中,分别采用 Tektronix TPP0101 电压探针和 LT 58-S7 电流传感器进行靶电压、靶电流检测,其波形通过 Tektronix TDS1012c-sc 示波器输出.检测 2 端分别与基体架和大地相连的 100  $\Omega$  电阻的电压,通过 Ohm 定律获得基体电流.利用 MMLAB-prob1 Langmuir 单探针探测复合 HIPIMS 放电时距离 Ti 靶 7.5 cm 处的等离子体参数  $V_s$ ,  $T_e$ ,  $N_e$ ,其探头为直径 0.2 mm,长 5 mm 圆柱形 W 丝.图2为 Langmuir 探针伏安特性曲线,横轴是探针的扫描电压( $E$ ),纵轴是探针收集的电流( $I$ ),取电子电流( $I_e$ )为正.探针伏安特性曲线一阶导数最大或二阶导数为 0 的点对应电位为  $V_s$ <sup>[18]</sup>,对应电流为饱和电子电流( $I_{es}$ );伏安特性曲线上使  $\ln I_e - E$  满足线性关系区域的电流、电压代入下式<sup>[18]</sup>:

$$kT_e = \left( \frac{\partial E}{\partial \ln I_e} \right) \quad (1)$$

通过式(1)求得  $T_e$ ,  $N_e$  由下式确定<sup>[18]</sup>:

$$N_e = \frac{I_{es}}{eA} \left[ \frac{2\pi m}{kT_e} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中,  $A$  为探针收集电流的有效面积,  $k$  为 Boltzmann 常数,  $m$  为电子质量,  $e$  为电子电量. 薄膜厚度采用 Alpha-Step IQ 台阶仪测量. 薄膜表面形貌及粗糙度利用 Dimension3100V 扫描探针显微镜 (SPM) 进行

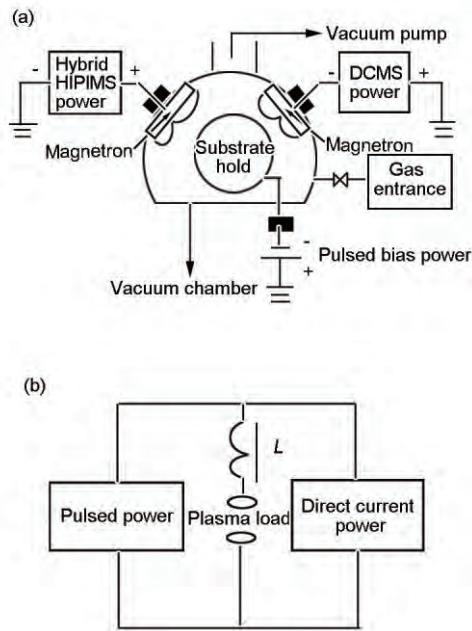


图1 复合高功率脉冲磁控溅射(HIPIMS)设备原理图

Fig.1 Schematic diagrams of hybrid high power impulse magnetron sputtering (HIPIMS) and conventional direct current magnetron sputtering (DCMS) deposition system (a) and a parallel connection operation mode of hybrid HIPIMS power supply (b) ( $L$ —inductive coil)

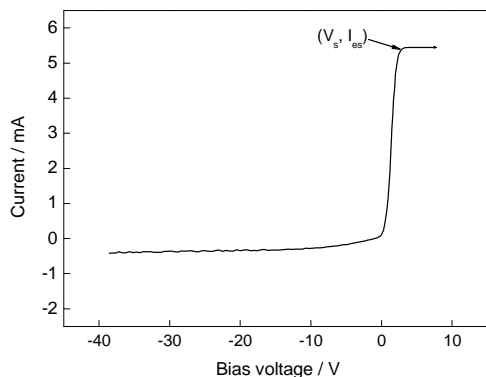


图2 Langmuir 探针伏安特性曲线

Fig.2 Langmuir probe current-voltage characteristic curve ( $V_s$ —plasma potential,  $I_{es}$ —saturated electron current)

表征. 采用 D8 Advance X 射线衍射仪 (XRD) 检测 Ti 薄膜晶体结构, Ti 薄膜力学性能利用 NANOG200 型纳米压痕仪测试.

## 2 结果与分析

### 2.1 耦合直流电流对靶电压与靶电流的影响

图 3 为不同耦合直流电流 ( $I_{dc}$ ) 时 Ti 靶电压与电流随时间的变化曲线. 耦合直流电流为 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 和 4.0 A 时, 靶平均功率 ( $P$ ) 分别为 480, 650, 1100, 1500 和 1900 W. 耦合直流电流增加, 靶平均功率增加, 促进等离子体预离化<sup>[14,15]</sup>. 复合 HIPIMS 放电过程中, 脉冲关闭期间, 靶电压和靶电流由耦合直流电源部分控制, 几乎不随时间变化. 脉冲作用期间, 靶电压与靶电流随时间变化并出现峰值. 对于恒电流模式工作的耦合直流电源部分, 直流电流决定直流电压大小, 故脉冲关闭时耦合直流电流增加促使靶电压增加. 脉冲作用期间, 一方面, 耦合直流电流越大, 预离化作用越强. 正离子在脉冲电压作用下加速向阴极靶碰撞, 阴极靶溅射能力增强, 靶电流增加<sup>[15]</sup>. 另一方面, 耦合直流电流增加, 热功率消耗增加, Ti 靶的阻抗增加<sup>[9]</sup>, 靶前气体变稀薄<sup>[4]</sup>, 导致靶电流下降. 所以, 当脉冲电压保持常数, 改变耦合直流电流, 脉冲作用期间靶电流变化取决于以上 2 方面因素相互作用, 在本工作中, 后者占主导地位.

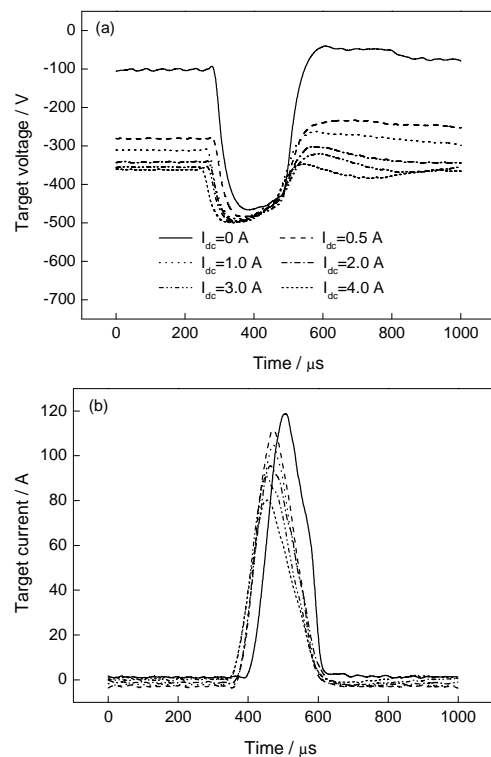


图3 耦合直流电流对Ti靶电压与电流的影响

Fig.3 Influence of coupling direct current ( $I_{dc}$ ) on the Ti target voltage (a) and current (b)

2.2 耦合直流电流对等离子体参数的影响

图4为耦合直流电流不同时等离子体参数变化曲线. 耦合直流电流较低时, 溅射靶原子较少, 与电子碰撞几率小<sup>[20]</sup>,  $V_s$ 和  $T_e$ 随耦合直流电流增加而增大; 耦合直流电流继续增加, 越来越多的溅射原子吸收电子能量<sup>[20]</sup>,  $V_s$ ,  $T_e$ 降低; 耦合直流电流为2.0 A时,  $V_s$ ,  $T_e$ 获得较大值, 分别为2.98 V和0.93 eV. 耦合直流电流增加,  $N_e$ 增加, 这是因为由直流磁控溅射部分产生的等离子体数量增加. 同时, 预离化作用增强<sup>[14,15]</sup>, 在脉冲关闭期间累积的用于溅射的正离子增加, 促进脉冲作用期间脉冲磁控溅射产生的等离子体数量增加. 当耦合直流电流在0.5~2.0 A变化时,  $N_e$ 从 $2.67 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ 增至 $6.71 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ . 耦合直流电流超过2.0 A时, 二次电子发射逐渐趋于饱和<sup>[20]</sup>, 高密度等离子体与二次电子频繁碰撞引发的能量损失<sup>[18]</sup>以及热功率消耗增加, 导致 $N_e$ 随耦合直流电流变化速度减慢.

2.3 耦合直流电流对基体电流峰值的影响

图5为不同耦合直流电流时基体电流随时间变化曲线, 测量过程中基体偏压0 V, 基架面积144 cm<sup>2</sup>. 耦合直流电流在0~0.5 A间变化时, 基体电流峰值增加. 由于在脉冲电源上并联直流电源, 等离子体的预离化作用增强, 磁控靶放电能力增强, 溅射粒子数量增加, 促使沉积室中等离子体密度增

加, 抵达基体等离子体数目增加, 基体电流峰值增大. 此时, 溅射原子离子化率提高比较明显. 当耦合直流电流在0.5~3.0 A间变化时, 基体电流峰值下降, 这与脉冲作用期间靶电流变化保持相同规律. 靶电流降低, 说明放电强度降低; 在基体偏压恒定时, 基体电流峰值下降表明耦合直流电流对提高溅射原子离子化率的贡献减小.

2.4 耦合直流电流对Ti薄膜结构特征的影响

图6为不同耦合直流电流与靶平均功率时Ti薄膜的沉积速率变化. 可以看出, 随着耦合直流电流增

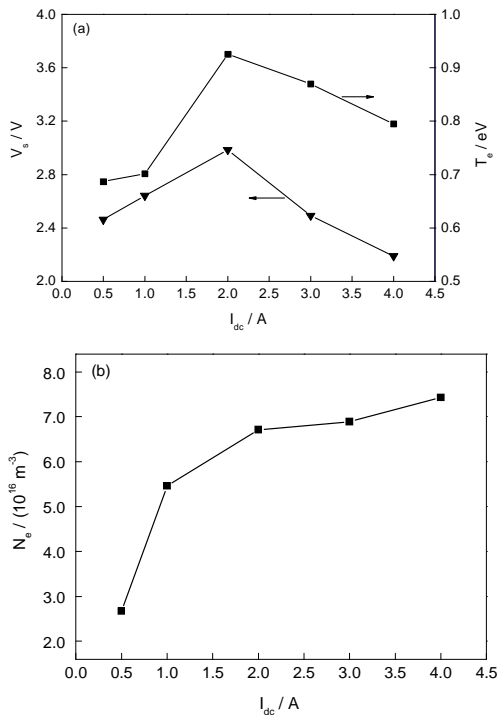


图4 耦合直流电流对等离子体参数的影响

Fig.4 Influence of  $I_{dc}$  on plasma potential  $V_s$ , electron temperature  $T_e$  (a) and plasma electron density  $N_e$  (b)

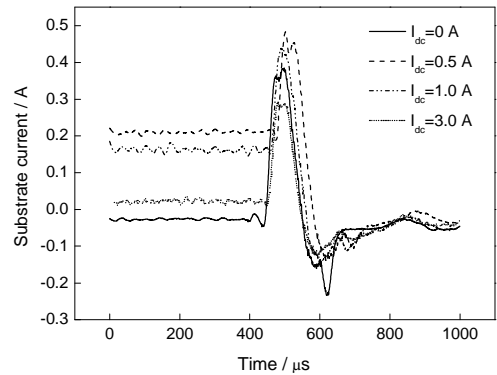


图5 耦合直流电流对基体电流的影响

Fig.5 Influence of  $I_{dc}$  on the substrate current

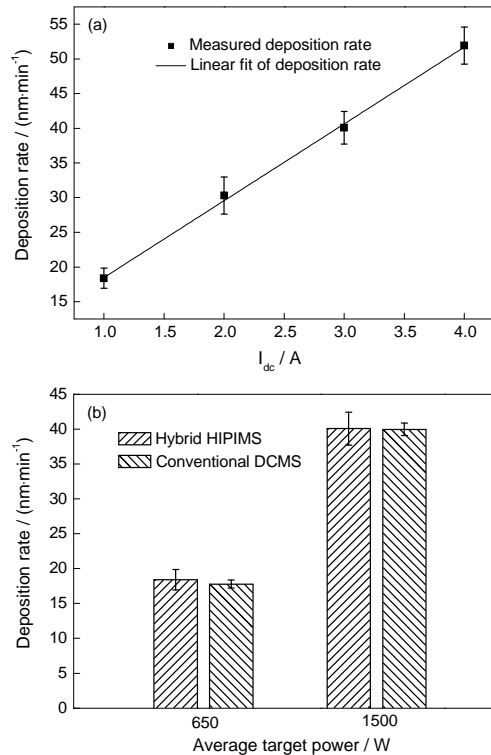


图6 不同耦合直流电流与靶平均功率时采用复合HIPIMS与传统DCMS技术制备的Ti薄膜沉积速率

Fig.6 Variation of deposition rates of Ti films with  $I_{dc}$  (a) and comparison of Ti films deposition rate between the hybrid HIPIMS and conventional DCMS (b) under different average target powers

加, 复合 HIPIMS 沉积 Ti 薄膜的速率从 18.39 nm/min 增加至 51.91 nm/min, 近似线性变化, 表明单位时间内抵达基体的等离子体密度近似线性增加. 与传统 DCMS 技术相比, 相同靶平均功率时, 2 者沉积速率相近(图 6b).

图 7 和 8 为不同耦合直流电流与靶平均功率时采用复合 HIPIMS 与传统 DCMS 技术制备的 Ti 薄膜表面形貌和粗糙度. 由图可知, 耦合直流电流在 1.0~4.0 A 变化时, 复合 HIPIMS Ti 薄膜表面颗粒尺寸增加, 颗粒与颗粒间隙增加, 薄膜平均粗糙度从 0.90 nm 增加至 3.40 nm. 其原因在于: 一方面, 耦合

直流增加, 靶平均功率增加, 入射粒子能量增强, 有助于促进粒子迁移扩散. 另一方面, 沉积速率增加, 阻碍粒子运动, 同时等离子体对薄膜表面的轰击作用和反溅射能力增强<sup>[21]</sup>, 导致薄膜粗糙度随耦合直流增加而增大. 与传统 DCMS 技术相比, 低的靶平均功率(低耦合直流电流, 靶平均功率 650 W)条件下采用复合 HIPIMS 技术制备的 Ti 薄膜更加光滑, 平均粗糙度为 0.90 nm, 比采用传统 DCMS 技术制备的 Ti 薄膜降低 1.32 nm, 这主要是因为复合 HIPIMS 技术中, 抵达基体等离子体能量较高, 有利于粒子迁移扩散, 使薄膜表面更光滑. 靶平均功率较高

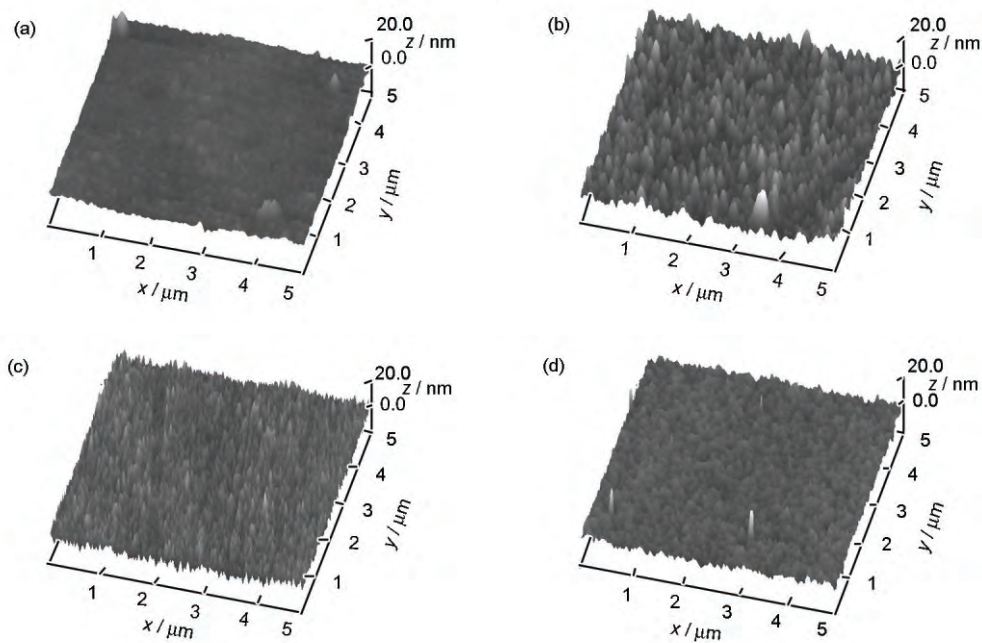


图 7 不同耦合直流电流与靶平均功率时采用复合 HIPIMS 与传统 DCMS 技术制备的 Ti 薄膜表面形貌

Fig.7 Surface morphologies of Ti films prepared by the hybrid HIPIMS and conventional DCMS with different  $I_{dc}$  and average target power  $P$

- (a) hybrid HIPIMS,  $I_{dc}=1.0\text{ A}$ ,  $P=650\text{ W}$
- (b) hybrid HIPIMS,  $I_{dc}=3.0\text{ A}$ ,  $P=1500\text{ W}$
- (c) conventional DCMS,  $P=650\text{ W}$
- (d) conventional DCMS,  $P=1500\text{ W}$

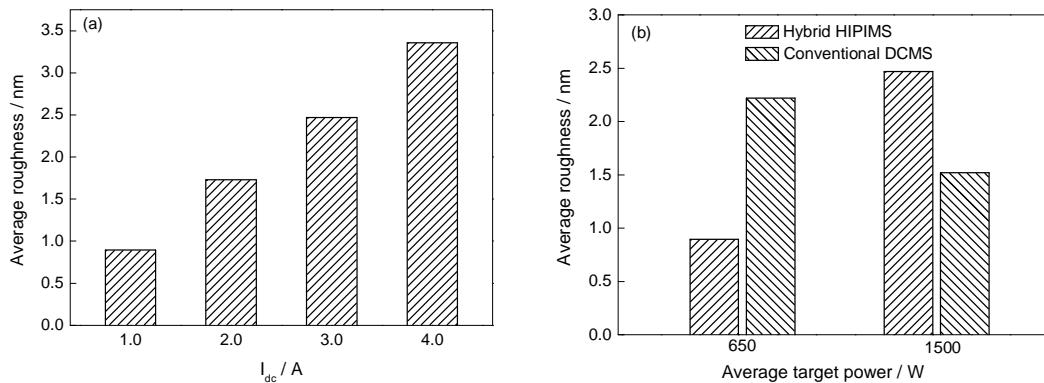


图 8 不同耦合直流电流与靶平均功率时采用复合 HIPIMS 与传统 DCMS 技术制备的 Ti 薄膜平均粗糙度

Fig.8 Average roughness of Ti films prepared by the hybrid HIPIMS with different  $I_{dc}$  (a) and comparison of average roughness of Ti films between the hybrid HIPIMS and conventional DCMS under different  $P$  (b)

时(高耦合直流电流,靶平均功率 1500 W),粒子能量很高,薄膜表面Ti原子脱附和等离子体刻蚀较严重<sup>[22]</sup>,与传统DCMS技术制备的Ti薄膜平均粗糙度 1.52 nm相比,其平均粗糙度反而增加,达 2.47 nm.

图9为不同耦合直流电流与靶平均功率时采用复合HIPIMS与传统DCMS技术制备的Ti薄膜的XRD谱.结果表明,2种工艺制备的Ti薄膜均为六方晶型.采用复合HIPIMS技术制备的Ti薄膜仅出现(002)衍射峰,呈现明显择优取向,耦合直流电流为

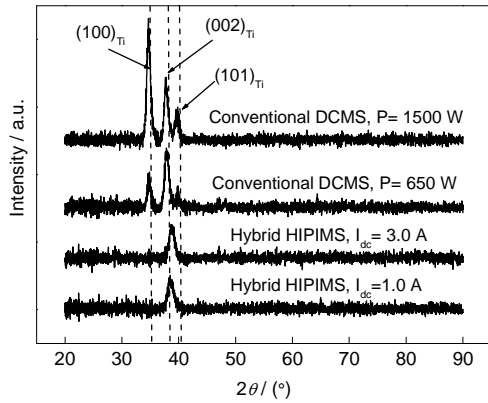


图9 不同耦合直流电流与靶平均功率时采用复合HIPIMS与传统DCMS技术制备的Ti薄膜XRD谱

Fig.9 XRD spectra of Ti films prepared by hybrid HIPIMS and conventional DCMS with different  $I_{dc}$  and  $P$

1.0和3.0 A时,薄膜晶粒尺寸分别为8.6和9.2 nm;传统DCMS技术制备的Ti薄膜呈现3个衍射峰,随着功率从650 W增加至1500 W,(100)衍射峰强度增强,晶粒尺寸从10.3 nm增加至12.6 nm(晶粒尺寸由Scherrer公式<sup>[23]</sup>近似计算).可见,复合HIPIMS技术可以促进Ti薄膜晶粒细化.2种工艺制备Ti薄膜产生结构差异的主要原因在于,2种技术下抵达基体的等离子体能量和离子比例不同.薄膜通过结构调整使其自由能,如表面能和应力应变能趋向于最小化<sup>[24]</sup>,从而处于稳定状态.

## 2.5 力学性能

图10为不同耦合直流电流与靶平均功率时采用复合HIPIMS与传统DCMS技术制备的Ti薄膜硬度和弹性模量.可见,耦合直流电流为1.0 A时,采用复合HIPIMS技术制备的Ti薄膜硬度和弹性模量较高,分别为10.20和150.93 GPa;耦合直流电流在1.0~3.0 A变化时,复合HIPIMS制备的Ti薄膜硬度和弹性模量略有降低;耦合直流电流在3.0~4.0 A变化时,Ti薄膜硬度和弹性模量略有增加.低的靶平均功率时(靶平均功率650 W),采用复合HIPIMS技术制备的Ti薄膜硬度比采用传统DCMS技术制备的Ti薄膜提高2.68 GPa,这主要源于薄膜结构及晶粒尺寸的影响<sup>[25,26]</sup>.由于复合HIPIMS制备Ti薄膜晶

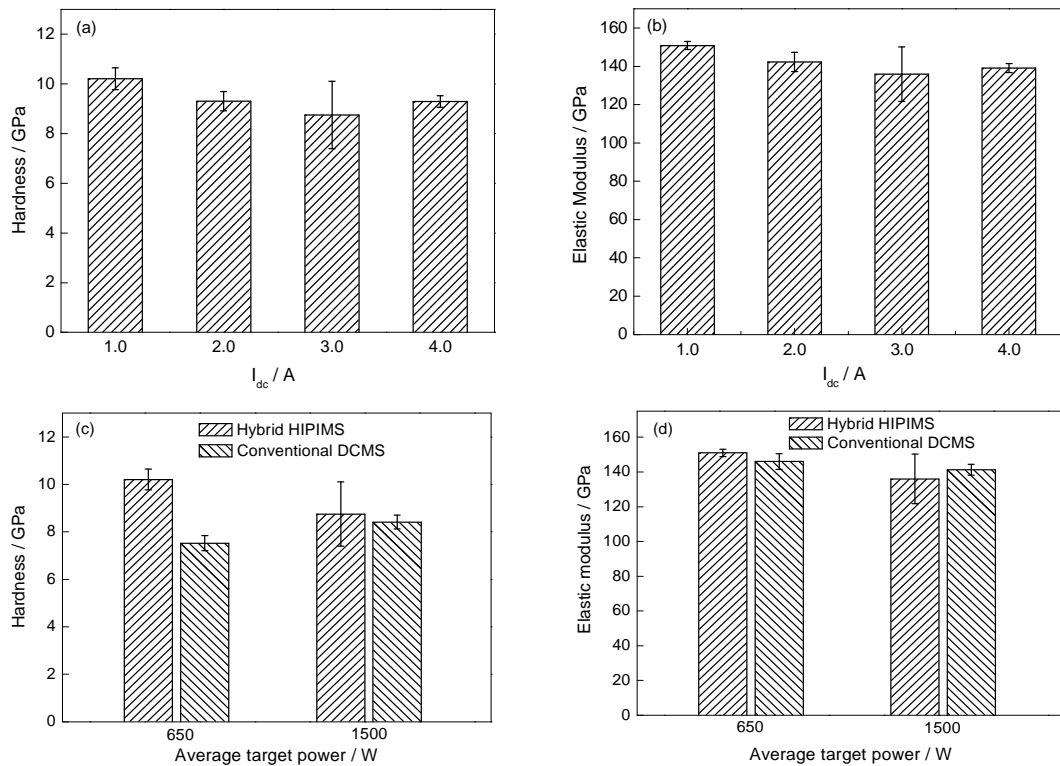


图10 不同耦合直流电流与靶平均功率时采用复合HIPIMS与传统DCMS技术制备的Ti薄膜硬度和弹性模量

Fig.10 Hardness (a), elastic modulus (b) of Ti films under different  $I_{dc}$  with the hybrid HIPIMS and comparison of hardness (c), elastic modulus (d) of Ti films between the hybrid HIPIMS and conventional DCMS under different  $P$

粒尺寸小, 位错运动困难<sup>[27]</sup>, 促进其硬度和弹性模量提高.

### 3 结论

(1) 耦合直流电流对复合高功率脉冲磁控溅射 (HIPIMS) Ti 靶放电特性和等离子体参数具有重要的影响. 耦合直流电流增加, 靶电流因热功率消耗和 Ti 靶阻抗增加而下降, 靶平均功率和等离子体预离化作用的增强有利于等离子体电子密度  $N_e$  增加, 溅射靶原子及其与电子碰撞几率的增加促使等离子体空间电位  $V_s$ , 电子温度  $T_e$  在耦合直流电流为 2.0 A 时出现较大值.

(2) 通过优化耦合直流电流对 Ti 薄膜微观结构与性能的影响, 在耦合直流电流 1.0 A 时获得平均粗糙和硬度分别为 0.9 nm 和 10.20 GPa 的 Ti 薄膜, 表明耦合直流电流 1.0 A 可以作为复合 HIPIMS 制备高质量 Ti 薄膜的一个优化值.

(3) 复合 HIPIMS 解决了 HIPIMS 技术薄膜沉积速率较低的问题, 与传统直流磁控溅射 (DCMS) 技术相比, 在相同靶平均功率时, Ti 薄膜沉积速率相当; 复合 HIPIMS 促进 Ti 薄膜晶粒细化, 表现出明显择优取向; 较低靶平均功率时 (650 W), 复合 HIPIMS Ti 薄膜表面更加光滑, 力学性能更加优异.

### 参考文献

- [1] Tong H H. *Heat Treatment Met*, 2008; 33(1): 91  
(童洪辉. 金属热处理, 2008; 33(1): 91)
- [2] Gudmundsson J T. *J Phys: Conf Ser*, 2008; 100: 082002
- [3] Kouznetsov V, Macak K, Schneider J M, Helmersson U, Petrov I. *Surf Coat Technol*, 1999; 122: 290
- [4] Sarakinos K, Alami J, Konstantinidis S. *Surf Coat Technol*, 2010; 204: 1661
- [5] Helmersson U, Lattemann M, Bohlmark J, Ehiasarian A P, Gudmundsson J T. *Thin Solid Films*, 2006; 513: 1
- [6] Alami J, Persson P O Å, Music P D, Gudmundsson J T, Bohlmark J, Helmersson U. *J Vac Sci Technol*, 2005; 23A: 278
- [7] Bohlmark J. *PhD Dissertation*, Linköping University, 2005
- [8] Čapek J, Hála M, Zabeida O, Klemberg-Sapieha J E, Martinu L. *J Appl Phys*, 2012; 111: 023301
- [9] Drache S, Stranak V, Herrendorf A P, Cada M, Hubicka Z, Tichy M, Hippler R. *Vacuum*, 2013; 90: 176
- [10] Anders A, Andersson J, Ehiasarian A. *J Appl Phys*, 2007; 102: 113303
- [11] Bohlmark J, Gudmundsson J T, Alami J, Lattemann M, Helmersson U. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2005; 33: 346
- [12] Bohlmark J, Alami J, Christou C, Ehiasarian A P, Helmersson U. *J Vac Sci Technol Vac Surf Films*, 2005; 23A: 18
- [13] Bohlmark J, Lattemann M, Gudmundsson J T, Ehiasarian A P, Gonzalvo Y A, Brenning N, Helmersson U. *Thin Solid Films*, 2006; 515: 1522
- [14] Poolcharuansin P, Bradley J W. *Surf Coat Technol*, 2011; 205: 307
- [15] Li X P. *Master Thesis*, Harbin Institute of Technology, 2008  
(李希平. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2008)
- [16] Tian X B, Wu Z Z, Shi J W, Li X P, Gong C Z, Yang S Q. *Chin Vac*, 2010; 47(3): 44  
(田修波, 吴忠振, 石经纬, 李希平, 巩春志, 杨士勤. 真空, 2010; 47(3): 44)
- [17] Wu Z Z, Zhu Z T, Gong C Z, Tian X B, Yang S Q, Li X P. *Chin Vac*, 2009; 46(3): 18  
(吴忠振, 朱宗涛, 巩春志, 田修波, 杨士勤, 李希平. 真空, 2009; 46(3): 18)
- [18] Ye C, Ning Z Y, Jiang M F, Wu X M, Xin Y. *The Plasma Diagnosis Principle and Technology in Low Pressure and Temperature*. Beijing: Science Press, 2010: 65  
(叶超, 宁兆元, 江美福, 吴雪梅, 辛煜. 低气压低温等离子体诊断原理与技术. 北京: 科学出版社, 2010: 65)
- [19] Duan W Z. *Master Thesis*, Harbin Institute of Technology, 2010  
(段伟赞. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2010)
- [20] Zhang Z G, Chen X M, Liu T W, Xu J, Deng X L, Dong C. *Chin J Vac Sci Technol*, 2005; 25(2): 110  
(张治国, 陈小钰, 刘天伟, 徐军, 邓新禄, 董闯. 真空科学与技术学报, 2005; 25(2): 110)
- [21] Duan L L. *Master Thesis*, Lanzhou University, 2008  
(段玲珑. 兰州大学硕士学位论文, 2008)
- [22] Cheng B X, Wu W D, He Z B, Xu H, Tang Y J, Lu T C. *High Power Laser Particle Beams*, 2006; 18(6): 961  
(程丙勋, 吴卫东, 何智兵, 许华, 唐永建, 卢铁城. 强激光与粒子束, 2006; 18(6): 961)
- [23] Burton A W, Ong K, Rea T, Chan I Y. *Microporous Mesoporous Mater*, 2009; 117: 75
- [24] Yang J. *Master Thesis*, Xihua University, Chengdu, 2010  
(杨江. 西华大学硕士学位论文, 成都, 2010)
- [25] Maria G D, Ferro D, Dalessio L, Techil R, Barinov S M. *J Mater Sci*, 2001; 36: 933
- [26] Greczynski G, Jensen J, Hultman L. *IEEE Transact Plasma Sci*, 2010; 38: 3046
- [27] Liu Z J, Shum P W, Shen Y G. *Thin Solid Films*, 2004; 468: 161