doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2012.05.003

高功率脉冲磁控溅射沉积原理与工艺研究进展*

吴志立,朱小鹏,雷明凯

(大连理工大学 材料科学与工程学院 表面工程实验室, 辽宁 大连 116024)

摘 要:高功率脉冲磁控溅射技术是一种峰值功率超过平均功率2个量级、溅射靶材原子高度离化的脉冲 溅射技术,作为一种新的离子化物理气相沉积技术,已成为国际研究的热点,有关高功率脉冲放电、等离子体 特性、薄膜及其工艺等方面的研究进展十分迅速。文中从高功率脉冲磁控溅射的原理出发,介绍10多年来 高功率脉冲电源的发展,从高功率脉冲放电等离子体特性与放电物理、等离子体模型,以及沉积速率和薄膜 特性等方面综述技术的研究进展。

关键词:高功率脉冲磁控溅射;等离子体;薄膜;研究进展 中图分类号:TG174.444 **文献标识码:A 文章编号:**1007-9289(2012)05-0015-06

Progress in Deposition Principle and Process Characteristics of High Power Pulse Magnetron Sputtering

WU Zhi-li, ZHU Xiao-peng, LEI Ming-kai

(Surface Engineering Laboratory, School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning)

Abstract: High power pulsed magnetron sputtering (HPPMS) is pulsed sputtering where the peak power exceeds the time-averaged power by two orders of magnitude and a very significant fraction of the sputtered atoms becomes ionized. As a new developing ionized physical vapor deposition, HPPMS has received extensive interest from researchers and led to a substantial increase of the publications related to the high power pulsed discharge, the plasma characteristic, and the films and their process. This paper describes the definition and the basic principle of HPPMS and reviews the recent advance in the high power pulsed power supply, the plasma characteristics and discharge physics, the plasma model and deposition rate, and the thin film properties for HPPMS.

Key words: high power pulsed magnetron sputtering; plasma; thin film; progress

0 引 言

高功率脉冲磁控溅射技术(High Power Pulsed Magnetron Sputtering-HPPMS)是近年来发展的一种离子化物理气相沉积新技术,采用高功率脉冲供电模式为磁控溅射阴极提供高达 2.8 kW・cm⁻²的峰值功率密度,可在基体获达 3.4 A・cm⁻²的电流密度(常规磁控溅射技术为 10 mA・cm⁻²),靶材粒子离化率达 100%,同时利用 5~400 Hz 的低脉

冲频率和1%~30%的低占空比,保证平均功率与 传统磁控溅射相当,使磁控溅射阴极不会因过热 而增加其冷却要求。高功率脉冲磁控溅射技术 作为一种新的磁控溅射技术,已成为国际研究的 热点,有关高功率脉冲放电、等离子体特性、薄膜 及其工艺等方面的研究进展十分迅速,而国内尚 处于起步阶段。

文中从高功率脉冲磁控溅射原理出发,首先

收稿日期:2012-07-17;**修回日期**:2012-09-07;**基金项目**:*国家重点基础研究发展计划(973计划)(2009CB724305);国家自然科学 基金青年基金(51102032);中国博士后科学基金面上项目(20110491520)

作者简介:吴志立(1979-),男(汉),湖南长沙人,博士后;研究方向:先进涂层与表面工程

网络出版日期: 2012-09-07 15:14; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120907.1514.007.html 引文格式: 吴志立,朱小鹏,雷明凯.高功率脉冲磁控溅射沉积原理与工艺研究进展 [J].中国表面工程,2012,25(5):15-20.

介绍 10 多年来高功率脉冲电源的发展历程,其 次从高功率脉冲放电和输运机制等方面综述等 离子体放电物理以及等离子体模型与沉积速率 等方面的最新研究进展,最后介绍沉积薄膜的 特性。

1 高功率脉冲磁控溅射原理与技术发展

1996年, Bugaev等^[1]将高功率脉冲施加于 灯丝辅助磁控空心阴极上,放电电压达 800 V 时,获得高达450 A的放电电流,实现了 Cu 薄膜 的高速沉积,为高功率脉冲磁控溅射的初期设 计。1999年, Kouznetsov等^[2]实现了在常规磁 控溅射条件下,峰值功率高达 MW 级的脉冲放 电,获得了Cu离化率高达70%的等离子体,提出 了高功率脉冲磁控溅射技术的概念。2011年, Anders 给出了高功率脉冲磁控溅射的全面定 义[3]:技术上定义为"高功率脉冲磁控溅射是一 种峰值功率超过平均功率 2 个量级的脉冲溅 射",表明高功率脉冲的间隔很长,而靶面内平均 的峰值功率密度通常超过 107 W/cm²;物理上定 义为"高功率脉冲磁控溅射是一种溅射靶材原子 高度离化的脉冲溅射",描述靶材离子自溅射将 主导溅射过程。

高功率脉冲磁控溅射电源是高功率脉冲磁 控溅射技术的关键,通常基于设计的脉冲形成集 成电路,由一个或多个电感电容耦合电路组成, 首先通过触发电路中的可控硅开关控制直流电 源由充电电路给电容充电,充电完毕后,再通过 可控硅开关控制串联的电感线圈施加至磁控溅 射阴极,靶上负电压快速上升至 kV 级,溅射气体 放电,电容储存能量快速释放产生等离子体,形 成高达数百安培的脉冲放电电流。电容和电感 的大小分别为 $1\sim50~\mu$ F和 $20\sim50~\mu$ H,基于不同 的电路设计,脉冲频率可在 $1\sim400~Hz$ 之间调 整,脉冲宽度为 $50\sim3~000~\mu$ s^[4]。

依据峰值电流密度和占空比,将高功率脉冲磁 控溅射分为常规高功率脉冲磁控溅射(High Power Impulse Magnetron Sputtering — HiPIMS)和新兴的 高功率调制脉冲磁控溅射(Modulated Pulsed Power Magnetron Sputtering — MPPMS),前者的峰值电流 密度在(0.5~10.0) kW• cm⁻²,占空比为 0.5%~ 5%,而后者分别为(0.05~1.00) kW• cm⁻²和1%~ 30%^[5]。HiPIMS 电源为传统的单一短脉冲形 式,电压在脉冲作用时间内先快速上升至 kV 级, 随后逐渐减小,典型放电波形如图 1 所示^[2],放电 电流可达近 kA 培,峰值功率可达 MW 级。新兴 的 MPPMS 电源通过微脉冲调控脉冲位形,降低 峰值电流和峰值功率约一个量级,而脉冲宽度拓 宽至 ms 级,最大可达 3 ms,占空比达 28%,且脉 冲作用时间内电压保持恒定,可实现包含预离化 过程的多段脉冲位形,进一步提高了高功率脉冲 磁控溅射的稳定性和可控性,典型放电波形如图 2 所示。



图 1 HiPIMS 典型电流和电压波形 (Ar 气溅射 Cu, 工作 气压 0.065 Pa)^[2]

Fig. 1 Typical voltage and current waveform for the HiP-IMS discharge (Cu cathode was sputtered by Ar gas at 0.065 Pa)^[2]



图 2 MPPMS 典型放电曲线(Ar 气溅射 Cu,工作气压 0.3 Pa)^[6] Fig. 2 Typical discharge waveform for the MPPMS discharge (Cu cathode was sputtered by Ar gas at 0.3 Pa)^[6]

2 高功率脉冲磁控溅射放电物理

2.1 等离子体特性与"雪崩"放电机制

高功率脉冲磁控溅射具有很高的靶材原子 离化率,已有的报道在20%~100%范围内^[4,7], 可产生离子密度高达 10¹³ cm⁻³的等离子体,放电 初期,靠近靶中心的刻蚀区上方形成高密度环状 等离子体,然后逐渐向外扩展^[8]。HiPIMS 脉冲 开启时电子能量分布为类 Druyvesteyn 分布或双 Maxwell分布,末期转变为双 Maxwell分布,在 脉冲停止作用数百微秒后最终转变为类 Maxwell 分布,而有效电子温度的峰值出现在脉冲触发数 微秒内,且与位置无关^[9]。靶材和气体离子的能 量分布均为双 Maxwell 分布,低气压下靶材离子 能量分布函数的主峰能量约为1 eV,来源于与热 气体离子和原子的碰撞,而高能分布能量可达 70 eV,来源于具有 Thompson 分布的溅射金属离 子由于碰撞而热化转变为 Maxwell 分布,高气压 条件下高能离子的比例减少,主要为低能离 子^[10]。MPPMS在Ar和Ar-N2混合气氛下溅 射 Cr 等离子体中主要由高束流低能多价 Cr 离 子组成,峰值能量约为5 eV,与直流磁控溅射相 当,而随着功率密度的提高,金属 Cr 的离化率可 达 90 %^[11], 而溅射 Ti 时的典型电子密度和能量 分别为 5×10¹¹ cm⁻³和 10 eV,增加脉冲频率可提 高电子温度,但电子密度降低,而升高气压可提 高电子密度,但电子温度降低[12]。

Anders 等^[3,13]提出高功率脉冲磁控溅射放 电为自溅射复合气体捕获循环辅助"雪崩"放电 机制,如图 3 所示,靶材和工作气体离子分别以 概率 β_{ι} 和 β_{g} 被电场加速返回轰击溅射靶材,溅射 系数分别为 $\gamma_{\iota,\iota}$ 和 $\gamma_{g,\iota}$,同时发射二次电子,发射 系数分别为 $\gamma_{sE(\iota)}$ 和 $\gamma_{sE(g)}$,循环往复,只有满足 Π $\equiv \sum_{\alpha_s \tilde{\beta}_s \tilde{\gamma}_s > 1$ 时,放电电流才可不断放大,产



图 3 高功率脉冲磁控溅射离子和原子束流示意图^[13] Fig. 3 Schematic representation of ion and atom fluxed in HPPMS^[13]

生"雪崩"放电,最终达到平衡形成稳态高电流放 电。由于 $α_1$ 和 $β_1$ 均小于 1,因此,只有 Cu 等具有 高自溅射系数的材料,即 $γ_{1,1} > 1$ 时才可实现自溅 射"雪崩"放电,对于过渡族金属和碳等低溅射产 额材料,循环捕获气体溅射产生的补充靶材离子 是实现高功率脉冲放电的基础和关键。

2.2 等离子体不稳定性与输运

HiPIMS 放电触发 10 μs 时产生离子声孤 波,传播速度受工作气压影响而与脉冲能量无 关,振幅随脉冲能量增加而增大,已不符合非线 性方程的经典数学解,且高功率脉冲停止工作很 长时间后,电子密度仍以 12.5 kHz 低频振荡^[14]。 离子声孤波的产生导致各种磁场和电场不稳定 性出现,引起电场、电子和离子以 MHz 尺度振 荡,使等离子体阻抗以及动量在电子和离子间的 转移发生混乱,进而影响等离子体中带电粒子的 传输,包括电子反常输运^[16]。

常规直流磁控溅射时,电子在靶面磁场约束 下的运动的符合经典 Bohm 扩散和碰撞传导理 论,方位角电流J。主要由 Hall 漂移产生,与放电 电流 J D 的比值 J 。/ J D 为 8~30 之间, 而高功率 脉冲磁控溅射时J。/J □≈2^[15],远低于常规直流 磁控溅射,表明电子输运过程不再符合 Bohm 扩 散理论。Brenning 等^[17]通过电子回旋角频率 $\omega_{\rm ge} = \frac{eB}{m}$ 和电子有效碰撞时间 $\tau_{\rm c}$ 以及两者乘积 $\omega_{\text{ge}}\tau_{\text{c}}$,给出高强脉冲等离子体的扩散系数、电阻率、 方位角电流等参数,发现其扩散速度高于 Bohm 扩 散速度达一个量级。由于电子的迁移速度远高于 离子,在与电场垂直的磁场分量作用下,于将产 生一个净电子流,形成一个由修正双束不稳定性 驱动的等离子体振荡波,电场强度为 E_{wie},对离 子施加一个与方位角电流同向的净作用力,引起 靶材离子沿切线方向作横向运动。HPPMS 放电 时 $\omega_{ge}\tau_{e}\approx 2$,表明其横向电阻率远高于常规磁控 溅射,横向作用力大幅增加,离子横向偏转加剧, 离子输运由传统磁控溅射的纵向运动转变为横 向和纵向正交运动^[16]。

3 等离子体模型与沉积速率

粒子模拟、流体模型及两者复合的混合模型 (hybrid model)是模拟磁控溅射放电等离子体的 常用方法,但对于高功率脉冲磁控溅射,放电等 离子体中含有高密度的靶材原子和离子,因而需 要更高的时空分辨率,导致粒子模拟和流体模型 无法在合理的时间尺度下求解,此外,模拟还需 运行更长的时间尺度来研究整个脉冲周期的行 为,因此,需要发展新的等离子体模型来描述高 功率脉冲磁控溅射的放电过程^[18]。

通过将高功率脉冲磁控溅射放电产生的靶 材和气体原子及离子流参数化、路径化,提出了 靶材粒子路径模型^[19],以及修正后的唯像平衡模 型^[20],给出了高功率脉冲与直流磁控溅射归一化 沉积速率比值系数 $\alpha \approx 1 - \alpha_1$, 说明高功率脉冲磁 控溅射沉积速率降低是由于靠近靶表面的溅射 离子被阴极鞘层吸回溅射靶表面导致的,靶材的 离化率 α_t 越高,损失越严重。第二类模型为时间 相关整体模型^[21],假设放电等离子体由电子 e、 Ar 原子、激发态 Ar* 原子、Ar+离子、金属原子 M 和离子 M⁺组成,建立了体积平均后的正负离子 平衡方程和能量平衡方程,通过数值求解获得了 在脉冲周期内各种粒子的密度以及相对离化率 的演变过程,发现在高功率脉冲作用下,高密度 二次电子迅速产生,并被磁场束缚在靶附近区 域,与溅射出来的金属原子发生碰撞电离,主导 的电离机制由 Penning 电离 (Ar* + M \rightarrow M⁺ + Ar+e)转变为电子碰撞电离(e+M→M⁺+2e), 离化率大幅增加。第三类为区域化模型,采用二 维流体模型和零维整体模型来分别描述 HiPIMS 的主等离子体区^[22]和离化区^[23]。前者考虑了电 子压力梯度产生的方位角电流作用,计算并说明 了 HiPIMS 具有高的横向电阻率,使其偏转加 剧,绕射能力增强。后者的主要修正包括限制了 离化区域,引入了拟合参数 Fpwr,代表电源功率 实际用于电子加热的比率,同时考虑了气体稀薄 化的影响。在此基础上,Kozak 等^[18]提出了非稳 模型,修正离化区形状为半球形,考虑了快慢电 子、靶材原子、气体原子和靶材、气体离子的复合 作用,保留了所有相关放电过程,同时通过整体 描述简化放电的空间特征,粒子的密度和束流可 通过对宏观体积积分表示,得以保证整体守恒方 程在整个电压脉冲内可解,提供了放电特征随时 间的演变过程。

高功率脉冲磁控溅射技术沉积速率损失问 题一直是各国学者关注的重点,平均功率相同 时,沉积速率只有直流磁控溅射的 25%~35%。 HPPMS产生靶材粒子高度离化的等离子体,含 有高密度的靶材离子,在电场作用下返回靶面产 生自溅射过程,导致靶材离子损失,以及溅射电 压差异引起的溅射产额损失是沉积速率损失的 主要原因,峰值电流、脉冲宽度等工艺参数以及 磁控阴极的磁场位形对沉积速率具有显著影响, 改变磁控阴极磁场位形,调控脉冲位形,优化工 艺参数是解决高功率脉冲磁控溅射沉积速率损 失问题的主要途径^[24-25]。

4 高功率脉冲磁控溅射沉积薄膜特性

与常规磁控溅射相比, HPPMS 虽同为低温 工艺,但由于靶材离子高度离化,可产生高达数 百 mA·cm⁻²的离子束流轰击,所沉积的薄膜具 有如下优点:① 在电子反常输运的影响下,离子 输运机制转变为横向和纵向正交运动机制,大幅 提高了绕镀能力,并可通过施加基片偏压提供电 场,控制靶材离子运动方向,实现全方位均匀沉 积,有利于在复杂零件表面制备均匀致密薄 膜^[26]。② 高密度离子束流轰击基体表面,在去 除基体表面污染的同时注入至薄膜与基体界面, 改变基体的取向和表面结构,使薄膜与基体之间 形成局部外延生长,获得化学键合界面,大幅增 强膜基结合强度[27-28]。③离子轰击可提高沉积 原子表面扩散能力,促进了晶粒的重复形核速率 和迁移速率,进而抑制贯穿薄膜厚度的柱状晶结 构形成,提高薄膜的致密度和均匀性,改善薄膜 硬度、耐磨和耐蚀等性能[4,29]。图4为直流和高 功率调制脉冲磁控溅射沉积 Cr 薄膜表面形貌, 如图 4 所示,由于高束流低能多价 Cr 离子的存 在,促进了Cr薄膜的重复形核速率和迁移速率, 薄膜的致密度提高,贯穿薄膜厚度的纳米柱状晶 被打断,趋向形成纳米等轴晶结构,即使在平均 功率高达4 kW 的条件下,薄膜的晶粒尺寸保持 100 nm 不变,而相同条件下,直流磁控溅射沉积 薄膜晶粒已长大至 μm 量级^[29]。

HPPMS 可制备 TiSiC、TiAlSiN 等纳米复合 薄膜,高束流离子轰击加速了纳米复合薄膜的 Spinodal 调幅分解,有利于形成两相完全分离的 纳米晶/非晶复合结构,硬度和韧性同步改善,刀 具切削寿命提高近1倍^[30]。同时,与直流磁控溅 射工艺复合,获得了低摩擦系数、硬度高达45 GPa 的 CrN/AlN 纳米超晶格薄膜^[31]。HPPMS 还被 用于制备 Al₂O₃、ZrO₂ 等氧化物薄膜,可抑制靶 材中毒现象,改善薄膜结构与性能的同时提高沉 积速率^[4]。

 dcMS
 MPPMS

 a1
 500 mm

 500 mm
 500 mm

 (a1) 4.0 kW (4.3±0.96) GPa
 (a2) 4.0 kW (15.2±0.82) GPa

 b1
 500 nm

 500 nm
 500 nm

 (b1) 3.0 kW (4.5±1.11) GPa
 (b2) 2.8 kW (12.8±0.68) GPa

 G1
 500 nm

 (c1) 2.0 kW (6.7±0.89) GPa
 (c2) 2.1 kW (10.4±0.85) GPa

d₁ 500 nm



 (d_1) 1.0 kW (8.2±0.56) GPa

图 4 直流和高功率调制脉冲磁控溅射沉积 Cr 薄膜表面 形象^[29]

Fig. 4 Surface morphologies of the dcMS and MPPMS sputtered Cr thin $films^{[29]}$

5 总结与展望

高功率脉冲磁控溅射技术是一种峰值功率 超过平均功率 2 个量级、溅射靶材原子高度离化 的脉冲溅射技术,直接采用高功率脉冲供电模式 为磁控溅射阴极提供百倍于常规磁控溅射的峰 值功率密度,产生高达 10¹³ cm⁻³的高密度二次电 子,原子电离机制由 Penning 电离转变为电子碰 撞电离,气体尤其是靶材离子束流大幅增加,在 鞘层电压作用下,返回轰击靶材表面溅射出靶材 原子,产生"雪崩"放电,放电电流急剧升高,最终 达到平衡形成稳态高电流放电。目前,短脉冲 HiPIMS和长脉冲MPPMS是高功率脉冲磁控溅 射的两种主要类型,前者峰值功率比后者高一个 量级,而后者则更稳定和可控,均具有高的靶材 原子离化率,可制备高性能的金属、氮化物、氧化 物、纳米多层和纳米复合薄膜,在高功率脉冲放电 物理、等离子体模型与沉积速率和薄膜特性等方取 得了显著进展,而国内的相关研究,尤其是 MP-PMS 相关研究刚刚起步,急需大力推进和发展。

参考文献

- [1] Bugaev S P, Koval N N, Sochugov N S, et al. Investigation of a high-current pulsed magnetron discharge initiated in the low-pressure diffuse arc plasma [C]. International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV, Berkeley, CA, USA, 1996; 1074-6.
- [2] Kouznetsov V, Macak K, Schneider J M, et al. A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities [J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 122(2/3): 290-293.
- [3] Anders A. Discharge physics of high power impulse magnetron sputtering [J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(S2): S1-S9.
- [4] Sarakinos K, Alami J, Konstantinidis S. High power pulsed magnetron sputtering: a review on scientific and engineering state of the art [J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(11): 1661-84.
- [5] Gudmundsson J T, Brenning N, Lundin D, et al. High power impulse magnetron sputtering discharge [J]. Journal of Vacuum Science and Technology A, 2012, 30 (3): 030801-35.
- [6] Wu Z L, Ma Y L, Meng D, et al. Effect of peak current on the structure of the modulated pulse power magnetron sputtered nano-copper thin films [J]. Surface and Coatings Technology, 2012, Submitted.
- [7] 吴忠振,朱宗涛,巩春志,等.高功率脉冲磁控溅射技术 的发展与研究[J].真空,2009,46(3):18-22.
- [8] Bohlmark J, Gudmundsson J T, Alami J, et al. Spatial electron density distribution in a high-power pulsed magnetron discharge [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(2): 346-347.
- [9] Pajdarova A D, Vlcek J, Kudlacek P, et al. Electron energy distributions and plasma parameters in high - power pulsed magnetron sputtering discharges [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2009, 18(2): 025008.
- [10] Hecimovic A, Burcalova K, Ehiasarian A P. Origins of ion energy distribution function (IEDF) in high power impulse magnetron sputtering (HIPIMS) plasma discharge [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(9): 095203-10.

- [11] Lin J, Moore J J, Sproul W D, et al. Ion energy and mass distributions of the plasma during modulated pulse power magnetron sputtering [J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(24): 3676-85.
- [12] Meng L, Cloud A N, Jung S, et al. Study of plasma dynamics in a modulated pulsed power magnetron discharge using a time-resolved Langmuir probe [J]. Journal of Vacuum Science and Technology A, 2011, 29(1): 011024-7.
- [13] Anders A, Capek J, Hala M, et al. The 'recycling trap': a generalized explanation of discharge runaway in high-power impulse magnetron sputtering [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012, 45(1): 012003-5.
- [14] Gylfason K B, Alami J, Helmersson U, et al. Ion-acoustic solitary waves in a high power pulsed magnetron sputtering discharge [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38(18): 3417-21.
- [15] Lundin D, Helmersson U, Kirkpatrick S, et al. Anomalous electron transport in high power impulse magnetron sputtering [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2008, 17(2): 025007-9.
- [16] Lundin D, Larsson P, Wallin E, et al. Cross field ion transport during high power impulse magnetron sputtering
 [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2008, 17 (3): 035021-6.
- Brenning N, Merlino R L, Lundin D, et al. Faster-thanbohm cross-B electron transport in strongly pulsed plasmas
 [J]. Physical Review Letters, 2009, 103(22); 225003-4.
- [18] Kozak T, Pajdarova A D. A non-stationary model for high power impulse magnetron sputtering discharges [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(10): 103303-11.
- [19] Christie D J. Target material pathways model for high power pulsed magnetron sputtering [J]. Journal of Vacuum Science and Technology A, 2005, 23(2): 330-335.
- [20] Vlcek J, Burcalova K. A phenomenological equilibrium model applicable to high-power pulsed magnetron sputtering [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2010, 19(6): 065010-12.
- [21] Gudmundsson J T. Ionization mechanism in the high power impulse magnetron sputtering (HiPIMS) discharge [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 100 (8): 082013-4.
- [22] Brenning N, Axnas I, Raadu M A, et al. A bulk plasma model for dc and HiPIMS magnetrons [J]. Plasma Sources

Science and Technology, 2008, 17(4): 045009-10.

- [23] Raadu M A, Axnas I, Gudmundsson J T, et al. An ionization region model for high-power impulse magnetron sputtering discharges [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2011, 20(6): 065007.
- [24] Lin J, Moore J J, Sproul W D, et al. Effects of the magnetic field strength on the modulated pulsed power magnetron sputtering of metallic films [J]. Journal of Vacuum Science and Technology A, 2011, 29(6): 061301-9.
- [25] Anders A. Deposition rates of high power impulse magnetron sputtering: physics and economics [J]. Journal of Vacuum Science and Technology A, 2010, 28(4): 783-790.
- [26] Lin J, Moore J J, Sproul W D, et al. Effect of negative substrate bias on the structure and properties of Ta coatings deposited using modulated pulse power magnetron sputtering [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(11): 3071-8.
- [27] Wu Z Z, Tian X B, Wang Z M, et al. Microstructure and mechanical properties of CrN films fabricated by high power pulsed magnetron discharge plasma immersion ion implantation and deposition [J]. Applied Surface Science, 2011, 258(1): 242-246.
- [28] Ehiasarian A P, Wen J G, Petrov I. Interface microstructure engineering by high power impulse magnetron sputtering for the enhancement of adhesion [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(5): 054301-10.
- [29] 吴志立.闭合场非平衡脉冲磁控溅射沉积碳氮化铬薄膜结构与性能研究[D].大连:大连理工大学,2010.
- [30] Bobzin K, Bagcivan N, Immich P, et al. Advantages of nanocomposite coatings deposited by high power pulse magnetron sputtering technology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(1): 165-170.
- [31] Lin J, Zhang N, Wu Z L, et al. Thick CrN/AlN superlattice coatings deposited by the hybrid modulated pulsed power and pulsed dc magnetron sputtering [J]. Surface and Coatings Technology, 2012, doi: 10.1016/j. surfcoat. 2011.11.037(In press): 1-6.

116024

作者地址: 辽宁省大连市大连理工大学 材料科学与工程学院 表面工程实验室 Tel: (0411) 8470 7255 E-mail: surfeng@dlut. edu. cn