

等离子体浸没离子注入与沉积技术的发展及前沿问题*

王浪平, 王小峰, 汤宝寅

(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 等离子体浸没离子注入与沉积技术可实现复杂形状零件表面垂直、均匀地离子注入与沉积处理, 在材料表面改性领域具有广泛的应用前景。在技术发明后的20年间, 该技术得到了快速的发展, 但是也遇到了如何提高离子注入效率和注入均匀性、内表面注入、大面积注入等一系列问题。若上述问题得到解决, 将极大的推进等离子体浸没离子注入与沉积技术的工业应用进程。

关键词: 等离子体浸没离子注入与沉积; 表面改性; 发展

中图分类号: TG172.444

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)01-0009-06

The Development and Key Problems of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition

WANG Lang-ping, WANG Xiao-feng, TANG Bao-yin

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

Abstract: Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition technology (PIIID) can obtain a uniform and perpendicular ion implantation on the components with sophisticated shape. It has shown great potential in surface modification for industrial components. After its invention, PIIID has developed rapidly in recent years. However, in order to get wide commercial applications, the methods for high efficiency ion implantation, inner surface ion implantation and large area ion implantation should be proposed.

Key words: plasma immersion ion implantation and deposition; surface modification; development

0 引言

等离子体浸没离子注入 (PIII) 技术最初由美国威斯康辛大学Conrad J R教授在1986年为材料表面改性而提出, 当时被称为等离子体源离子注入 (Plasma Source Ion Implantation), 简称PSII^[1]。由于PSII技术也被用于半导体材料处理与微电子器件制作研究, 为了不和束线离子注入过程中的离子源相混淆, 部分学者将PSII改称为等离子体浸没离子注入 (Plasma Immersion Ion Implantation), 简称PIII, 或PI³。1996年, 美国劳伦茨国家实验室 (LBL) 的学者提出了金属离子注入与沉积相结合的处理工艺, 把PIII称为MePIIID (Metal Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition)^[2], 后来也有学者将其称为PIIID (Plasma Immersion Ion Implantation

and Deposition), 或PIII&D。在我国, 部分学者称PIII为全方位离子注入 (AOII)。从PIII技术发明到现在, 研究手段已从当初的气体离子注入发展复合离子注入与沉积技术, 在精密零件、生物材料等领域取得了一定的应用。但是, 要实现大规模的工业应用, PIII技术还面临内表面离子注入、大面积离子注入、批量注入效率等需要迫切解决的难题。

1 等离子体浸没离子注入与沉积技术的发展状况

1.1 PIII工艺的发展

早期PIII研究与开发工作是在室温氮等离子体中进行的。钻头、模具、钛合金人工关节等经过氮等离子体PIII处理后, 其硬度、耐磨损、抗腐蚀性性能都有较大提高, 特别是对于Ti、Cr、V等合金元素含量较高的合金材料, 在氮PIII处理后, 其表面硬度、耐磨损、抗腐蚀性性能都有非常明显改进^[3];

收稿日期: 2009-09-27; 修回日期: 2009-12-25

基金项目: *国家自然科学基金项目(10875033)

作者简介: 王浪平(1974—), 男(汉), 湖南宁乡人, 副教授, 博士。

与此同时,利用碳氢化合物(甲烷、乙炔)放电形成的碳等离子体PIII过程,成功地在零件表面制备了高硬度、低摩擦因数、化学性能非常稳定的类金刚石(DLC)膜层,显著地提高了零件抗磨损、抗腐蚀能力。早期大量的PIII研究与开发工作充分表明:PIII技术对于提高不锈钢、轴承钢、钛合金、铝合金等多种金属及其合金的抗磨损、抗腐蚀和抗疲劳能力是非常显著的,因而近十几年来PIII技术获得了快速发展。

此外,由于PIII有较低的注入能量、高的注入剂量率、大的处理面积、设备简单、处理时间短及处理费用低的优点;它弥补了离子束注入技术(IBII)在低能处理方面的严重不足,显示了它在半导体材料处理与微电子器件制作应用中的独特优势,因而PIII技术也很快被学者们广泛、成功地用于半导体材料处理与微电子器件制作。例如,高密度等离子体PIII室温处理用于深沟道侧壁保形掺杂;低离子能量(1 keV)和高电流密度PIII制备有超浅结的0.1 μm 微电子器件;PIII低能等离子体掺杂在大直径硅片上制备亚微米(100 nm) p+/n浅结,及平板显示器的薄膜晶体管(TFT);经济地生产SOI(silicon-on-insulator)、SIMOX(separation by implantation of oxygen)、SPIMOX(separation by plasma immersion of oxygen)晶片。此外,PIII技术还成功地用于离子切割与粘结SOI晶片,微电子器件互连用的深沟到填充金属,制备埋置微腔、光发射多孔硅等等^[3]。

随后,国内外少数几个研究小组很快把PIII过程扩展到非气体等离子体,其中取得最出色研究成果的是Brown I G教授领导的美国劳伦茨贝克利国家实验室(LBL)的研究小组,把阴极弧放电薄膜沉积与PIII过程结合在一起,对材料表面既实现了离子注入,又实现了薄膜沉积处理,使材料表面制备了有足够膜厚的、膜基结合力非常牢固的多种金属膜、合金膜、化合物膜,获得了单纯气体等离子体无法获得的非常优良的表面特性,他们把该技术称为MePIIID。所采用的金属等离子体源被他们称为金属蒸汽真空电弧(MEVVA)等离子体源^[2]。

由于离子注入的改性层很薄,单纯离子注入处理还不可能使某些重要零部件(如航空发动机主轴轴承等)经受住高速、重载下长期工作的考核。如果将离子注入、薄膜沉积、表面固体润滑或表面超

低摩擦因数等技术复合处理,那么这些零部件耐磨损能力将得到大幅度提高,使用寿命也将大大延长,这样的复合处理技术将使材料能够满足新的工程应用需要。这种从工程应用具体情况出发进行优化设计,使两种或多种表面处理技术优化组合在一起的复合处理技术,可使零件表面获得单种表面处理技术无法得到的、非常优良的表面特性,因而近几年来复合表面处理技术越来越受到研究人员的重视,在短短的几年时间内获得了迅速发展^[4]。

1.2 PIII装置的发展

(1) 脉冲阴极弧等离子体源

脉冲阴极弧等离子体源是PIIID装置的一个非常重要的部件,是实现金属离子注入、离子束混合、PIII与薄膜沉积相结合、PIII与反应磁控溅射相结合、有反应气体参与的金属离子注入、无氢类金刚石(DLC)膜制备,以及多种复合处理工艺的关键设备。

阴极弧等离子体源的典型结构如图1所示。约为10 kV的触发电极接触紧套着阴极的绝缘磁套表面、之后瞬间断开,绝缘磁套表面发生爬电、短路,阴极表面的强电场使阴极表面产生电弧放电,同时阴极表面的触须或尖端在表面强电场作用下产生强烈的场致发射,发射出大量的电子,并蒸发出大量金属原子与金属微粒,阴极表面温度迅速升高,阴极表面局部区域被熔化、蒸发并形成炽热的斑点,它们被称为阴极斑点。在阴极表面附近形成的稠密金属蒸气被阴极表面发射出的电子电离,形成高密度的金属等离子体,在阳极电位作用下,放电迅速过渡到整个阴极与阳极之间,高密度金属等离

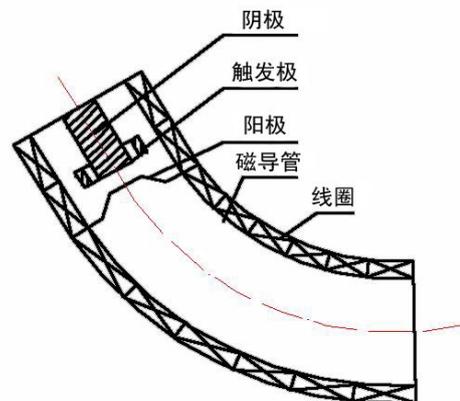


图1 脉冲阴极弧等离子体源结构

Fig.1 Schematic of pulsed cathodic arc plasma source

子体以超声速通过阳极孔向真空室扩散。由于等离子体中含有大量的宏观粒子,需要采取带有一定角度的磁导管将宏观粒子过滤掉。等离子体中的金属离子就在工件负偏压的作用下注入、沉积在工件表面,表面沉积的薄膜由于受到离子的轰击,膜层粒子被离子反冲注入到基体近表面层内,被处理零件表面形成膜基结合力非常牢固的、有优良表面特性的厚的金属膜、合金膜、化合物膜、陶瓷膜。

目前,脉冲阴极弧等离子体源当前主要向大面积、高沉积速率,高占空比的方向发展。目前研制的脉冲阴极弧源引出口直径可到200 mm,最大沉积离子流超过2 A,脉冲占空比超过20%,使用寿命超过 1.3×10^6 个脉冲^[5]。

(2) 高压脉冲电源

高压脉冲电源是PIII系统的关键设备之一,高压脉冲电源的核心部分是高压脉冲调制器。PIII技术对高压脉冲调制器性能的要求主要有3点:①能够输出大的电流,以满足零件工业规模批量、复合处理的需要;②脉冲宽度连续可调范围较大,以满足离子注入与薄膜沉积两个方面的需要;③有合适的高压脉冲前沿与后沿,前沿以约50~100 kV/ μ s比较合适^[3]。

目前,用于PIII过程的高压脉冲调制器主要有二种:线性脉冲调制器和刚性脉冲调制器,后者又分为真空电子管脉冲调制器和固态脉冲调制器。线性脉冲调制器较少用于PIII技术,因为它的阻抗匹配和脉冲宽度调节范围都有限,不能满足PIII技术的需要。在PIII技术中最常用的是真空电子管脉冲调制器,但是它的电流上升速率小、占空因子低及能耗高,无法在PIII工业规模应用中采用。代表脉冲调制器技术当前最高水平的是固态脉冲调制器,它广泛用于高功率军用雷达、电视发射机、高能粒子加速器等。目前仍只有为数很少的PIII研究组采用这种固态脉冲调制,原因它的技术复杂,造价昂贵,几乎占整个PIII系统费用的一半,目前商用的固态脉冲调制器的脉冲电压下降时间也过长,不能完全满足PIII技术对脉冲调制器技术的要求。近十年来,随着大功率固态脉冲调制器应用领域扩大,研制技术水平的迅速提高,半导体功率器件制作技术成熟,成本的大幅下降,研制满足零件PIII批量处理的新型、价格低廉、大功率固态脉冲调制器条件已成熟,它将有力地推动PIII、PIIID零件批

量、复合处理技术的进一步发展^[6]。

1.3 PIII过程鞘层动力学计算机理论数值模拟技术

在零件PIII处理过程中,一个离不开的问题是如何改善零件表面注入剂量均匀性。在PIII过程中,处理工艺参数不合适,如注入电压过高、等离子体密度过低、电压脉冲宽度过长,常使鞘层厚度增加,使鞘层形状与靶(被处理零件)形状不一致,两者失去了共形性,从而引起靶表面注入剂量不均匀性;在零件PIII批量处理过程中,相邻零件的鞘层相互重叠、相互影响,靶台与夹具对被处理零件鞘层的影响也会使注入剂量不均匀性问题变得更复杂、更严重。

从PIII过程的物理模型研究出发,利用鞘层动力学计算机理论数值模拟,可以很好地揭示PIII过程中被处理零件表面注入剂量不均匀性产生的原因,提出一系列的有效改善注入剂量均匀性的技术措施,使零件表面注入剂量不均匀性得到显著改善。近几年来,鞘层动力学计算机理论数值模拟的研究水平有了很大的提高,它已成为研究与改善注入剂量不均匀性的非常有效的技术手段,成为定性研究与定量研究各种PIIID处理过程的有效工具。目前,用气体PIII技术对单个零件进行处理时,鞘层动力学计算机理论数值模拟结果与实验测量结果的一致性很好,被处理零件表面的注入剂量不均匀性得到明显改善,这方面的研究工作报导较多^[8-10]。

1.4 PI IID技术的工业应用

PIII技术发展到现在,已经在一些具有高附加值的精密零件上得到应用,大幅地提高了零件在强摩擦磨损条件下的抗磨损能力。图2为采用PIIID方法处理的偏心轴照片,经过PIIID处理后,零件表面的干摩擦因数可以达到0.15,磨透圈数超过2万转。



图2 PI IID 处理后的偏心轴照片

Fig.2 Picture of shafts after PI IID treatment

2 等离子体浸没离子注入与沉积技术的前沿问题

2.1 内表面离子注入与沉积技术

随着高新技术的发展,管道内表面改性越来越显得重要与迫切。管道、空腔、孔及沟道内表面改性对于IBII和PIII技术都是一个难度很大的的研究课题,特别对于内径较小、纵横比较大的管道。内表面的PIII过程鞘层动力学计算机理论数值模拟揭示了内表面处理的许多物理与技术问题。Sheridan T E用一维冷等离子体流体模型对圆筒内表面PIII处理进行了鞘层动力学计算机理论数值模拟^[11],结果表明:在内表面的PIII处理过程中确实存在着严重的注入能量偏低的问题。在此基础上有学者提出了二维鞘层动力学计算机理论数值模拟,模拟结果揭示了导致圆筒内表面注入剂量和注入能量偏低的根本原因在于:筒内鞘层的扩展特性和交叉重叠。为了解决圆筒内表面PIII处理的低剂量和低能量问题,采用偏转电场法对圆筒内表面进行PIII处理,可以有效提高圆筒内表面注入剂量和注入能量。

近十年来,等离子体技术用于管道内表面改性的研究日益增多,出现了一些很有价值的技术方案,如:栅网增强沉积法,高能粒子束溅射沉积法,空心阴极法,磁控溅射沉积法等等^[12-14],在这些很有新意的实验装置中获得了不少有吸引力的研究成果。高能粒子束轰击管道中心处设置的金属或合金棒,利用溅射沉积技术可对金属管道内表面进行薄膜涂敷处理,但是这种方法的处理效率很低;利用空心阴极技术可在内径为8 mm的管道内表面制备TiN膜;磁场增强等离子体(MFEP)沉积技术,可将类金刚石(DLC)膜沉积到管道内表面等等。到目前为止,这些研究与开发工作仍然处于实验室研究阶段,有些重要的物理与技术问题急待研究解决,如膜基结合力、膜层均匀性、处理效率等等,但是它们有力地推动了内表面改性技术的发展。近几年来,脉冲高压辉光放电技术用于圆筒内表面改性处理^[15],显示出它的良好商业应用前景。研究工作是针对着滚动轴承外圈内滚道的批量处理进行的。多个轴承外套圈被垂直垒放成一个圆筒,这样,轴承外套圈内滚道的表面改性处理问题就转变为圆筒内表面改性处理问题。

总的说来,当前这些技术获得的表面强化层性

能很难达到外表面改性层所获得的性能,还需要进一步的发展。

2.2 大面积离子注入与沉积技术

大面积等离子体源是提高离子注入与沉积效率的关键,大面积的气体等离子体源很容易产生,但是大面积的金属等离子体很难获得。

目前,国际上一般采用阴极弧放电的方式来产生金属等离子体,但是,这种放电过程产生的金属等离子体中含有大量微米尺度的金属液滴等宏观粒子,而这些大颗粒粒子将大幅度降低表面强化层的性能,必须采用宏观粒子过滤系统去除这些大颗粒,从而获得纯净的金属等离子体。目前,国内外大部分研究单位均采用磁导管方式来过滤宏观粒子。但是,由于磁导管方式形成的金属等离子体其密度呈近似高斯分布,为了在特定区域内获得比较均匀的沉积速率,该区域面积一般不能超过磁导管出口面积的一半。

采用磁导管方式过滤宏观粒子时,传输长度对金属等离子体密度的衰减有很大影响,而磁导管直径越大,等离子体传输距离也越长。因此,在大直径磁导管过滤系统中金属等离子体衰减很快,使出口处金属等离子体密度大大降低,从而降低了离子注入与沉积的效率。基于上述原因,国际上研制的磁导管过滤式金属等离子体源的出口直径均比较小。例如美国Lawrence Berkeley国家实验室研制的金属等离子体源出口直径为150 mm^[16];韩国材料与加工研究所研制的金属等离子体源出口直径为198 mm^[17];俄罗斯核物理所研制的金属离子源出口直径为200 mm^[18];新加坡南洋理工大学研制的金属等离子体源出口直径为150 mm^[19]。

为了获得大面积金属等离子体,国外已经进行了较多的研究,提出了以下几种研究方案:前苏联的Gorokhovsky等人采用90°矩形过滤系统+矩形阴极的结构研制了一个大面积直流弧金属等离子体源^[20],这种技术主要通过阴极斑点的扫描保证沉积的均匀性。但是,在脉冲状态下,由于无法控制阴极斑点的移动,这种方式不适合获得大面积的脉冲金属等离子体,而脉冲金属等离子体是形成高质量全方位离子注入与沉积层的关键因素之一。

美国的Welty等人研制了一种双阴极+轴对称型过滤器的大面积金属等离子体源^[21],这种方法采

用两个对称分布的阴极产生金属等离子体, 通过合理设计磁场, 可以使金属等离子体从两个阴极中心的垂直方向进行叠加, 这种方法可以获得很高的等离子体传输效率和大面积的金属等离子体。但此方案只能保证单一方向上金属等离子体的均匀性, 而很难获得一个平面内均匀分布的金属等离子体。

乌克兰的Aksenov和Ryabchikov等人提出了一种百叶窗型过滤器, 在百叶窗叶片之间加上1 kA以上的电流形成强磁场, 可以使等离子体从过滤器叶片之间通过, 而大直径的宏观粒子将被倾斜的叶片挡住。由于这种过滤器长度很小, 它可以获得很高的等离子体传输效率。但是, 由单个阴极弧源产生的金属等离子体体积非常小, 运动速度很快, 等离子体在很短的距离内很难形成大面积均匀的金属等离子体, 目前百叶窗型过滤器形成的等离子体均匀区域只能达到 $\phi 180$ mm左右^[22]。

因此, 提高金属等离子体源的输出面积、提高沉积效率, 是当前PIII技术走向工业化应用必须解决的问题。

2.3 批量离子注入技术

与单个零件PIII处理相比较, 多个零件PIII批量处理技术与工艺要复杂得多, 因为把多个零件摆放在一起进行PIII批量处理时, 相邻零件的鞘层相互影响、相互重叠, 严重影响零件表面注入剂量均匀性, 导致零件表面改性效果明显变差。

根据“保形”离子注入理论, 鞘层碰撞而产生的鞘层形状变化将导致注入剂量的不均匀性。因此, 要实现批量处理过程中零件表面注入剂量的均匀性, 必须保证批量处理过程中任意零件周围的离子鞘层不发生碰撞。根据Conrad J R等人的研究结果, 在典型的PIII处理参数(注入电压为20 kV, 等离子体密度为 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 高压脉宽为10 μs)条件下, 球形零件的鞘层厚度达到了0.1 m^[23]。要保证批量处理时相邻零件周围的离子鞘层不发生交叉重叠, 要求相邻球体之间的距离大于0.2 m, 这样大的距离将极大的限制批量处理的效率。虽然通过提高等离子体密度、窄脉冲注入等方式可以减小鞘层厚度, 但是由于这些参数与鞘层厚度之间并不是成正比关系, 鞘层厚度减小值有限。而且, 大面积高密度等离子体、窄脉冲高重复频率脉冲高压在技术上实现起来也非常困难。通过降低注入电压也可以减

小鞘层厚度, 但是, 低的注入能量将会影响表面改性的效果, 因此在PIII批量处理时通过降低偏压来减小鞘层厚度的方法应用也极为有限。

PIII处理时鞘层中的等势线分布表明等势线在鞘层内部并非均匀分布。0.1等势线与0等势线(即鞘层边缘)之间距离最大, 超过鞘层总厚度的1/2, 但是该段电场对离子运动的影响只有鞘层中总电场的1/10左右。因此, PIII批量处理过程中相邻零件形成的离子鞘层即使发生较大范围的碰撞也有可能不会对离子运动方向产生很大的影响。基于以上分析, 哈工大的研究人员提出了“鞘层有限碰撞”离子注入这一技术, 即在PIII批量处理过程中通过控制相邻零件周围离子鞘层的碰撞程度, 使离子运动方向不发生大的改变以保证离子注入剂量的均匀性, 又能将它们之间摆放距离远小于2倍鞘层厚度, 从而提高批量处理的效率。图3为批量注入时鞘层的形状。这种方法有可能为PIII批量处理提供一种新的思路。

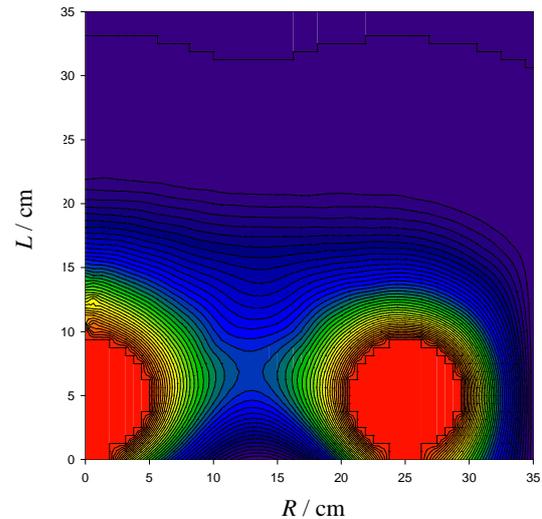


图3 球形零件鞘层有限碰撞过程的模拟结果
Fig.3 Simulation results of infinite sheath collision in PIII process

3 结论

(1) 等离子体浸没离子注入与沉积技术在精密零件表面强化领域显示了广泛的应用前景, 近二十年的研究已经使其得到了快速的发展。

(2) 等离子体浸没离子注入与沉积技术在大面积离子注入、批量注入的均匀性、内表面注入等方面还需要进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] Conrad J R, Castagna T. Plasma source ion implantation for surface modification [J]. Bull. Am. Phys. Soc. 1986, 31: 1479.
- [2] Anders A. Metal plasma immersion ion implantation and deposition: A review [J]. Surf. Coat. Tech. 1997, 93: 157-167.
- [3] Anders A. Handbook of Plasma immersion ion implantation and deposition [M]. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [4] Wang Yuhang, Wang Langping, Yu Yonghao, et al. DLC film fabrication on the inner surface of a cylinder by carbon ion implantation [J]. IEEE T. Plasma Sci. 2006, 34(4): 1116-1120.
- [5] Wang Langping, Huang Lei, Xie Zhiwen, et al. Fourth-generation plasma immersion ion implantation and deposition facility for hybrid surface modification layer fabrication [J]. Rev. Sci. Instrum. 2008, 79, 023306.
- [6] Matossian J N, Goebel D M. Design characteristics of a 100kV, 100kW plasma ion implantation facility [J]. Surf. Coat. Technol. 1996, 85: 86-91.
- [7] 甘孔银, 汤宝寅, 王浪平, 等. 用于全方位离子注入的10kV固体脉冲调制器研制 [J]. 中国表面工程, 2003, 4(61): 34-38.
- [8] Sheridan T E. Simulation of plasma-based ion implantation of a sawtooth target [J]. Surf. Coat. Technol. 1997, 93: 225-228.
- [9] Conrad J R. Sheath Thickness and Potential Profiles of Ion-matrix Sheaths for Cylindrical and Spherical Electrodes [J]. J. Appl. Phys. 1987, 62(3): 777-779.
- [10] Liu A G, Wang X F, Wang S Y, et al. Simulation of dose uniformity for different pulse durations during inner surface plasma immersion ion Implantation [J]. J. Vac. Sci. Technol. B. 1999, 17(2): 875-878.
- [11] Sheridan T E. Ion-matrix Sheath in a Cylindrical Bore [J]. J. Appl. Phys.. 1993, 74(8): 4903-4906.
- [12] Demokan O. Ion implantation and deposition on the inner surfaces of cylinders by exploding metallic foils [J]. IEEE T. Plasma Sci. 2000, 28, 1720-1724.
- [13] Liu B, Zhang G L, Cheng D J, et al. Inner surface coating of TiN by the grid-enhanced plasma source ion implantation technique [J]. J. Vac. Sci. Technol. A. 2001, 19 (6): 2958-2962.
- [14] Yukimura K, Kuze E. Coating and ion implantation to the inner surface of a pipe by metal plasma-based ion implantation and deposition [J]. Surf. Coat. Tech. 2003, 169, 411-414.
- [15] Wang Langping, Lu Yang, Wang Xiaofeng, et al. Ion implantation and energy loss effect during high-voltage pulsed glow discharge in a tube [J]. Appl. Phys. Lett. 2009, 95, 101501.
- [16] Anders A. Approaches to rid cathodic arc plasmas of macro- and nanoparticles: a review [J]. Surf. Coat. Technol. 1999, 120: 319-330.
- [17] Kim Jong-Kuk, Kim Do-Geun, Byon Eungsun, et al. Effect of plasma duct bias on the plasma characteristics of a filtered vacuum arc source [J]. Thin Solid Films. 2003, 444: 23-28.
- [18] Igor B Stepanov, Alexander I. Ryabchikov. High-current vacuum-arc ion and plasma source "Raduga-5" application to intermetallic phase formation [J]. Rev. Sci. Instrum. 2006, 03: 03C115.
- [19] Tay B K, Zhao Z W, Chua D H C. Review of metal oxide films deposited by filtered cathodic vacuum arc technique [J]. Mater. Sci. Eng. R. 2006, 52: 1-48.
- [20] Gorokhovskiy V I, Polistchok V P, Yartsev I M. Processes in a plasma arc installation for vacuum coating depositions: Part 1. Plasma generation [J]. Surf. Coat. Technol. 1993, 61:101-107.
- [21] Vetter J, Perry A J. Advances in cathodic arc technology using electrons extracted from the vacuum arc [J]. Surf. Coat. Technol. 1993, 61: 305-309.
- [22] Vladimir I Gorokhovskiy, Rabi Bhattacharya, Deepak G Bhat. Characterization of large area filtered arc deposition technology: part I plasma processing parameters [J]. Surf. Coat. Tech. 2001, 14: 82-92.
- [23] Conrad J R. Sheath thickness and potential profiles of ion-matrix sheaths for cylindrical and spherical electrodes [J]. J. Appl. Phys. 1987, 62 (3): 777-779.

作者地址: 哈尔滨市哈尔滨工业大学 150001
材料楼 416 室
Tel: (0451) 8641 8728
E-mail: aplpwang@hit.edu.cn