

# 过滤式真空电弧离子镀膜技术及应用

王 浩

(五邑大学数学物理系, 广东, 江门 529020)

(收稿日期 1997-02-04)

## FILTERED VACUUM ARC ION COATING AND IT'S APPLICATION

Wang Hao

(Department of Mathematics and Physics Wuyi University, Jiangmen, Guangdong 529020)

**Abstract:** A technique — filtered vacuum arc ion coating for thin film deposition — is reviewed in this paper. The typical experimental setup for this technique is deduced in detail, characteristics of arc plasma ions and macroparticles in Aksenov filter are analyzed theoretically. Laesly, some examples about applications and overview of this new technique are discussed.

**Keywords:** Ion coating, Vacuum arc, Filter.

**摘 要:** 介绍了一种新的镀膜技术——过滤式真空电弧离子镀膜技术。针对典型的过滤式真空电弧镀膜装置,描述了其结构组成,分析了它的工作原理。分析结果表明,该技术与传统真空电弧离子镀膜技术相比,可有效地消除宏观颗粒对镀层的污染,可广泛应用于制作各种微电子膜透明导电薄膜(ITO)以及类金刚石(DLC)薄膜。

**关键词:** 离子镀膜、真空电弧、过滤。

**分类号:** TB79、TS255.2、TS255.5、TN305.8。

近年来,真空电弧离子镀膜技术在工业上获得了日益广泛的应用。特别是工业刀具上的 TiN、TiC 等超硬镀层,能显著提高其表面微硬度、耐磨性及耐蚀性,可使刀具使用寿命延长 5~10 倍,具有很高的经济效益<sup>[1]</sup>。随着应用范围的不断扩大,特别是在微电子、光学等精细镀层的应用中,该技术的发展遇到了一些障碍。最大的障碍是由于原理上的缺陷所带来的宏观颗粒污染问题<sup>[2]</sup>。传统真空电弧中,阴极弧源在发射大量电子及金属蒸气的同时,由于局部区域的过热而伴随着一些熔化的金属液滴的喷射。液滴直径一般在 10  $\mu\text{m}$  左右,大大超过离子的直径,称其为宏观颗粒。当宏观颗粒随同等离子体流一起到达被镀工件表面时,将对镀层性能产生一系列的影响。在许多情形下,这种影响是有害的。主要表现为使镀层表面粗糙度增加,镀层附着力降低并出现剥落现象,镀层严重不均匀等。习惯称这种现象为宏观颗粒污染。许多工程技术人员都致力于如何克服这一缺陷。这些努力是从两方面着手的。一是抑制宏观颗粒的发射,力图消除污染源。如采用外加横向磁场控制阴极斑点的运动、采用易散热阴极来降低表面局部区域的严重过热,以及采用脉冲电弧放电抑制阴极斑点寿命等方法。二是设计宏观颗粒过滤器,通过控制宏观颗粒的运动,将其从等离子体流中过滤掉,使之不混入镀层之中。

## 1 结 构

典型的过滤式真空电弧离子镀装置结构示意图如图 1 所示。其核心结构是一个 Aksenov

过滤器,最早由 Aksenov 提出。它是一个具有螺旋管电磁线圈的不锈钢或石英弯管。电磁线圈提供控制等离子体流运动的外加磁场,该磁场方向是沿管的轴向方向。这一弯管是该技术区别于传统真空电弧离子镀膜的显著标志。它的作用一方面是过滤和阻挡宏观颗粒,另一方面则是引导离子进入镀件所在的沉积室。其设计的合理程度将对过滤效果及离子的传递效率产生关键的影响。其中一个准则就是要尽量减小电子在管道中的运动,以建立一个足够强的空间电场来引导离子向沉积室方向加速运动。设计时线圈所产生的外磁场一般在  $0.005\sim 0.02\text{ T}$  范围内。这一相对较弱的磁场不可能对离子的运动产生直接的影响。而它却可以对管道内等离子体流中的电子产生强烈的约束作用。从而在管道中建立一个强的加速空间电场。该电场对过滤器离子传递效率起决定作用。设计时还要考虑到,虽然大部分宏观颗粒将被排斥在管道之外,但也有一小部分发射角较大的颗粒也将进入弯管内部。它们因与带电粒子碰撞而荷电,并在某些方向上得到加速。得到加速的宏观颗粒与管壁碰撞之后的结果,一部分吸附在管壁,而另一部分则被管壁反射。如果对其反射方向不加以控制,它们将随同离子流一起进入沉积室,从而影响过滤效果。因此,在弯管内部有可能进入沉积室的反射轨道中,应设置若干个挡板,以阻挡反射颗粒进入沉积室内。一般情况下,弯管具有悬浮的电位。在镀膜过程中,当螺旋管线圈所产生的磁场逐渐增大时,其悬浮电位将从负极性向正极性转变。这种极性的转变正反映了在外磁场作用下,等离子体中粒子的空间分布发生了改变。即弯管内壁吸附电子,而离子向沉积室内基片上运动的事实。但在有些过滤装置中,整个管壁被直接作为接地阳极使用。

背面水冷圆柱形阴极弧源靶安装在过滤弯管的一端,在其发射面的前方有一个环状阳极。阳极在这里不仅作为直流电弧放电的一极,而且起到了一个等离子体流引出喷口的作用。两极之间的电弧被一个接触式的电动触发针引燃,形成自持放电。沉积室安装在弯管的另一端,被镀工件可置于其中。工件上可施加负偏压,以利吸引离子,偏压范围一般在  $100\sim 500\text{ V}$  左右。整个系统本底真空要求达到  $10^{-4}\text{ Pa}$ 。

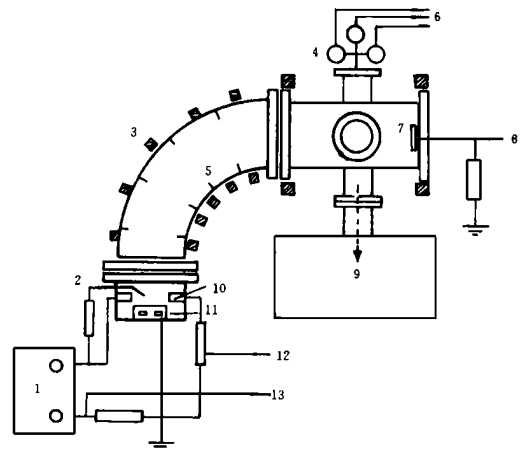


图1 过滤式真空电弧离子镀膜装置结构示意图  
1—电源；2—触发器；3—电磁线圈；4—真空规；5—过滤弯管；6—接控制与记录系统；7—基底；8—离子流测量；9—真空系统；10—阳极；11—阴极；12—弧电压测量；13—弧电流测量

## 2 工作原理

严格地说,阴极真空电弧并非真正的“真空”电弧,而是燃烧于两极之间的金属蒸气电弧。电弧被引燃之后,放电将集中在阴极表面的阴极斑点区域。阴极斑点具有很高的电流密度,约  $10^7\text{ A/m}^2$  (左右) 和极高的温度。由于场致发射和热电子发射的双重作用,阴极斑点将发射出大量的电子。同时由于热的作用而使阴极斑点区和阴极金属材料熔化并蒸发。蒸发后的金属蒸气在阴极前方约一个自由行程区,被电子离子化。对大部分金属来说,其离子化率高达 90% 以上。因此,称这一区域为电离区。同时,由于电子迁移率高,将此离子先离开这一区域,从而在电离区留下一个正的空间电荷层。为保持等离子体的准中性,在阴极前势必形成一个势垒。该势垒阻滞电子而加速离子,使离子加速离开这一区域,进入过滤弯管。而在弯管内部,由于外磁

场的作用,电子受到强烈的约束,将发生绕弯管轴线的振荡。其振荡频率可由 Vlasov 方程求出<sup>[3]</sup>。电子的强烈振荡,将在弯管内部产生一空间电场。该电场使离子的运动得到约束与控制,使之以一定轨道向沉积室运动,从而保证离子的传递效率及离子具有足够的能量。

阴极在发射电子的同时,也将伴随着宏观颗粒的发射。其发射原因部分是由反射离子引起的。由于离子运动的随机性,一部分离子将向阴极表面运动。当反射离子与阴极表面熔化金属液池相碰撞时,将其能量传递给液池。当这一能量足够克服液池表面张力时,将导致液滴的喷射。统计分析表明,大部分颗粒都以较小的发射角(与阴极表面所夹角)离开阴极<sup>[4]</sup>。因此,它们都将被排斥在过滤弯管之外。但也将有小部分发射角较大的颗粒随同等离子体流一起进入弯管内部。此时由于弯管内挡板的作用,宏观颗粒将被阻挡,最终不能混入镀层中,起到充分过滤的效果。真空电弧离子镀的优势在于离化率高、离子能量高及镀膜速率高。那么在加上过滤弯管之后是否会影响这些指标呢?关键取决于离子在过滤器中的传递效率。

首先应当计算出过滤弯管内电子在外磁场作用下引起振荡而产生的空间电场的标量电位分布。该电场将对离子运动起到控制作用,使离子沿一定轨迹运动。考虑离子在空间电场下的运动方程,即可从理论上计算出离子在管道内的运动轨迹。一般来说,可以作到离子运动轨迹被约束在沿管道的轴线方向上,离子传递效率可达到 80% 以上。

### 3 应用与展望

过滤式真空电弧离子镀膜技术出现伊始,便获得了广泛的应用。除传统 TiN 耐磨镀层用作铸币模具表面层之外,还在微电子薄膜元件、透明导电薄膜及类金刚石膜等领域迅速得到扩展。利用该技术制备的不含氢键的非晶硅薄膜,无论从生产效率还是薄膜性能上来看,都比传统等离子体化学气相沉积技术制备的非晶硅氢占优势。它可望在太阳能电池及其它电子元件上获得应用<sup>[5]</sup>。而利用该技术制备的  $\text{WO}_3$ 、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 、 $\text{CuO}$  等氧化物薄膜,则被用作大功率射频元件的高发射率涂层,以增加其表面辐射传热<sup>[6]</sup>。而  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的应用,则获得了未见报导的最高折射率和最低消光系数等指标<sup>[7]</sup>。 $\text{ZrO}_2$  薄膜也获得前所未有的最佳光学特性<sup>[8]</sup>。室温下玻璃衬底上过滤电弧制备的  $\text{SnO}_2$  透明导电膜,在经  $350\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $30\text{ s}$  退火后,其导电率等于或大于任何其它方法制备的未掺杂氧化锡薄膜导电率<sup>[9]</sup>。而在  $\text{GaAs}$  衬底上制备的  $\text{SnO}_2$  薄膜,则被用作肖特基势垒光电二极管<sup>[10]</sup>。早期的研究集中在利用过滤式真空电弧离子镀制备 DLC 膜。到目前为止,所获得的 DLC 膜微硬度可达  $180\text{ GPa}$ 、高于天然金刚石(111)晶面微硬度( $100\text{ GPa}$ )。电阻值高达  $10^8\ \Omega$ ,晶体结构为纳米微晶,晶粒大小  $1\sim 5\text{ nm}$ ,  $\text{SP}^3$  键含量可达 85%,折射率为  $1.6\sim 2.8$ <sup>[11]</sup>。

过滤式真空电弧离子镀膜技术既保留了真空电弧离子镀膜技术离化率高、离子能量高和生产效率高的“三高”优势,又有效克服了宏观颗粒对镀层的污染,大大扩展了真空电弧离子镀的使用范围。是一种在装饰镀层、耐磨涂层、微电子元件、薄膜光电器件等领域极具应用前景的新技术。但由于它出现时间不长,在产业化的过程中还有许多问题尚待解决。基础研究也跟不上实际发展,有关过滤器中离子、宏观颗粒的运动特性,基片偏压和温度对镀层性能的影响等等问题的理论与实验研究,都将对该技术的发展起到推动的作用。

### 参 考 文 献

- 1 王浩,林金铭,程礼椿.关于真空电弧镀膜研究中的几个问题.电加工,1992(6):2

- 2 王浩·VAD 制备 TiN 膜宏观颗粒生长特性分析·微细加工技术,1995(4):38
- 3 Sander D M, Bercler D B, Falabella S A. Review on vacuum arc coating. IEEE Trans·Plasma Sci., 1990, 18:883
- 4 Daalder J E, Phys J. Cathode erosion from macroparticle ejection in a high current vacuum arc. D:Appl·Phys., 1975, 8:1647
- 5 Arrbilly D, Boxman R L, Goldsmith S et al. Amorphous Si thin film prepared by vacuum arc deposition. Thin Solid Films, 1994, 253:62
- 6 Anders S, Aders A, Rubin M et al. Formation of metal oxides by cathodic arc deposition. Surf·Coat·Techmol., 1995, 76/77:167
- 7 Schemmel T D, Cunningham R L, Randhawa H et al. Substrate temperature influence on the structure of TiN films deposited by vacuum arc. Thin Solid Films, 1989, 181:597
- 8 Martin P J, Netterfield R P, Kinder J J. Ion beam deposition films produced by filtered arc evaporation. Thin Solid Films, 1990, 193/194:136
- 9 Ben-Shalom A, Kaplan L, Boxman R L et al. SnO<sub>2</sub> transparent conductor films produced by filtered vacuum arc deposition. Thin Solid Films, 1993, 236:20
- 10 Kaplan L, Ben-Shalom A, Boxman R L et al. Annealing and Sb doping of Sn O films produced by filtered vacuum arc deposition; structure and electro-optical properties. Thin Solid Films, 1994, 253:1
- 11 Boxman R L, Zhitomirsky V, Altemkop B et al. Recent progress in filtered vacuum arc deposition. Proc·Int·Conf·Metallurgical Coatings and Thin Films, ICMCF-96, San Diego, April 1996, 1:397

**作者简介:** 王浩,男,1967年10月出生。1994年6月毕业于华中理工大学,获工学博士学位。1996年6月于北京大学技术物理系完成博士后研究,获物理学博士后证书。现为五邑大学数学物理系副教授,广东省物理学会理事。主要从事薄膜及纳米材料的制备、结构及其磁学与光学特性的研究。负责或参加完成多项国家科研项目,在国内外发表论文40余篇。

## 利用声波制冷

目前,美国科学家正在研究一种新的声波制冷技术。它只利用微弱的声振动来制冷。美国物理学家惠特立领导的一个研究小组已制成一台样机,结构非常简单。在直径约90 cm的圆筒内,叠放着几片矩形玻璃纤维板。筒内充满了氦气或其他气体,筒的一端死,另一端用有弹性的隔膜封闭。隔膜上的一根导线与磁性音圈连接,形成一个微传声器。音圈的快速振动,把声波传到圆筒里,这样制冷就开始了。它是根据气体压缩时变热,膨胀时变冷这一原理制成的。当隔膜在音圈的作用下来回振动时,就会改变圆筒内氦气的压力,筒内温度也会相应变化。如果筒内没有玻璃纤维板,那么隔膜只起一个活塞的作用,它只能使气体的温度下降,而不能制冷。筒内加入玻璃纤维板以后,它就可把压缩产生的热量沿着板体,通过隔膜传出去。因此,玻璃纤维板的一端变得很热,而另一端由于热量被传走,却变得很冷。所以在圆筒的一端造成低温。惠特立说:“这台样机很有实用价值,但还要进一步解决筒的一端迅速排出热的问题”。