

磁场模拟在磁控溅射/阴极弧离子镀中的应用 *

雷 浩, 肖金泉, 郎文昌, 张小波, 宫 骏, 孙 超

(中国科学院金属研究所 材料表面工程研究部, 沈阳 110016)

摘 要: 针对磁控溅射和阴极弧离子镀沉积技术存在的局限性, 采用有限元分析方法(Finite element method, FEM)进行磁场模拟, 优化设计外加电磁线圈的结构和磁场分布位形, 并应用于磁控溅射沉积透明导电氧化物和阴极弧离子镀沉积硬质薄膜中。分析了外加电磁线圈磁场对磁控溅射等离子体辉光变化、磁控靶磁场平衡度/非平衡度、以及线圈位置对等离子体特性和靶材利用率的影响。设计和制作了轴对称磁场和旋转磁场, 研究了它们对阴极弧离子镀弧斑运动形貌和薄膜表面大颗粒等特性的影响。通过控制弧斑运动状态, 可以得到不同程度的颗粒分布, 实现颗粒的可控沉积, 减少薄膜表面大颗粒的污染。

关键词: 外加电磁线圈; 磁控溅射; 阴极弧离子镀; 旋转磁场; 弧源设计

中图分类号: TG174.444; TB43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2015)02-0027-18

Application of Magnetic Field Simulation on Magnetron Sputtering and Cathodic Arc Ion Plating Deposition Techniques

LEI Hao, XIAO Jin-quan, LANG Wen-chang, ZHANG Xiao-bo, GONG Jun, SUN Chao

(Surface Engineering of Materials Division, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract: Aiming at the limitations in magnetron sputtering and cathodic arc ion plating deposition techniques, this paper introduces the optimal design of external electromagnetic coil structure and magnetic field configuration distribution, simulates the magnetic field by using the finite element method(FEM), and applies the optimal design to deposition of transparent conductive oxides by magnetron sputtering and deposition of hard coatings by cathodic arc ion plating. The magnetic role of external electromagnetic coil on the glowing discharge plasma in magnetron sputtering was analyzed. The influences of the magnetic field balance/unbalance coefficient and the coil position on the plasma characteristics and utilization rate of the target were investigated. An axisymmetric magnetic field and a rotating magnetic field used in the cathodic arc ion plating were designed and produced, and their effects on the organization of spots moving and suppressing the macroparticles on the film surface were summarized. The results show that controllable particle size and distribution in cathodic arc ion plating can be realized by tuning the spots moving state, which is very efficient in reducing the contamination of macroparticles on the film surface.

Keywords: external electromagnetic coil; magnetron sputtering; cathodic arc ion plating; rotating magnetic field; arc source design

收稿日期: 2014-12-18; **修回日期:** 2015-01-22; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51171197); 辽宁省自然科学基金(2013020132)

通讯作者: 孙超(1960-), 男(汉), 研究员, 博士; **研究方向:** 薄膜与涂层制备; **Tel:** (024) 8397 8081; **E-mail:** csun@imr.ac.cn

网络出版日期: 2015-03-11 09:49; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150311.1010.012.html>

引文格式: 雷浩, 肖金泉, 郎文昌, 等. 磁场模拟在磁控溅射/阴极弧离子镀中的应用 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(2): 27-44. Lei H, Xiao J Q, Lang W C, et al. Application of magnetic field simulation on magnetron sputtering and cathodic arc ion plating deposition techniques [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(2): 27-44.

0 引言

磁控溅射和阴极弧离子镀是在高真空环境下非常重要的两种物理气相沉积技术,已广泛应用于工业生产中。磁控溅射是在磁控阴极靶材和阳极之间施加直流电压,产生异常辉光放电使氩气发生电离,氩离子被阴极加速并轰击靶材表面,将靶材表面原子溅射出来沉积在基底表面上形成薄膜,呈现高电压、小电流的放电特点,具有较低的沉积温度和较高的膜基结合力。目前,磁控溅射发展的主要驱动力是降低工艺成本、解决工艺难题和优化工艺参数,前两者需要提高靶材利用率、薄膜沉积速率、薄膜均匀性以及溅射过程稳定性等;后者要求增加溅射原子离化率、实现独立控制/调节微观等离子体参数等,以便更好地满足实际镀膜工艺中的多种需求。由于磁控溅射靶的磁场分布对靶材利用率、溅射速率与沉积薄膜的性能及质量有着重要的影响,可通过调整磁控靶内部磁路分布改变其非平衡度,增强基片区域的等离子体密度以及反应气体的离化率,但该方法也存在一定局限性:①磁控靶表面过度发散的磁力线,会削弱磁控靶面对电子/等离子体的约束能力,造成磁控靶的阻抗较高,磁控靶起辉电压过高,功率密度过小;②磁控靶永磁体所产生的磁场强度随靶基距增大衰减很快,在距离靶面几厘米之外的基片区域的场强只有几个高斯,难以对基片区域电子和离子运动产生较大影响;③薄膜沉积的不同工艺,需要不同非平衡度的磁控靶,而用同一固定磁场强度磁控溅射靶有时难以满足要求。为解决以上问题,常用的方法之一是在磁控靶外加同轴电磁线圈^[1-2],而电磁线圈的位置排布和激励模式会影响辉光等离子体的特性,因此,外加磁场的激励效应对优化磁控溅射靶的磁场平衡系数(K_G)、靶材利用率、溅射速率以及沉积薄膜的性能和质量具有重要意义。

阴极弧离子镀是在真空环境下利用阴极靶材通过电弧放电产生金属等离子体,进而沉积到加载负偏压的工件上后形成薄膜,呈现大电流、低电压的放电特点,具有离子能量高、沉积速度快、绕镀性好、膜基结合力高,膜层致密性、离化率(约70%~80%)高等优点^[3]。但由于阴极弧斑具有很高的功率密度(10^{16} W/m²),在金属等离子体发射的同时,大颗粒也伴随着等离子体喷射出来^[4-5],沉积到薄膜表面后形成污染,不仅导

致表面粗糙度增加降低了薄膜的光泽,同时也严重恶化了薄膜的质量与性能^[6]。为了消除大颗粒污染,人们通常采用磁过滤技术^[7],尤其是采用弯管磁过滤技术^[8]可以大大降低薄膜表面大颗粒的数量,但会造成沉积效率的急剧下降。由于电弧等离子体具有良好的导电性、电准中性与磁场的可作用性等特点,可采用靶材后旋转永磁体来改变磁场在靶面的分布,从而影响弧斑在靶面的刻蚀位置^[9],但这种方法需额外增加复杂的机械控制机构,磁场的位形、强度可调性差,且涉及到密封、冷却等诸问题。采用电磁线圈产生外加横向磁场,可控制阴极弧斑运动,并明显加速弧斑运动速度,降低阴极斑点在熔池区的停留时间,减小液态熔池的面积,减少所沉积薄膜表面的大颗粒污染^[10]。

有限元法(Finite element method, FEM)是较为常用的磁场模拟方法,其基本原理是把求解的区域划分成若干小区域,这些小区域称为“单元”或“有限元”,从而采用线性/非线性方法求解每个小区域,各个小区域的结果总和便是整个区域的解。目前有很多软件可以对磁场进行有限元分析,如 ANSYS 和 POISSON SUPERFISH 等,其中 ANSYS 是基于数值计算的一种大型通用有限元法软件,可以方便地对磁场系统进行建模和分析,并可以形象地画出磁力线分布以及磁场强度的云图;而 POISSON SUPERFISH 具有强大的磁场分析模拟计算功能,以及相对较好的前后处理能力。

因此,文中详细介绍了课题组近年来采用 FEM 软件进行的磁场模拟,以及对外加电磁线圈的结构和磁场分布位形的优化设计。总结了磁场对磁控溅射中等离子体辉光变化、磁控靶磁场平衡度/非平衡度、阴极弧离子镀中电弧斑点运动形貌和磁场类型、以及减少薄膜表面大颗粒等特性的影响,并将磁场设计应用在磁控溅射和阴极弧离子镀沉积薄膜过程中。

1 磁场模拟及其在磁控溅射沉积透明导电氧化物薄膜中的应用^[11]

1.1 磁场模拟和外加电磁线圈的设计

磁控溅射电磁场模拟所用的靶材为圆形平面靶,磁场设计非平衡系数 K_G 为 1.5,属中等平衡度/非平衡磁控靶^[12],其结构示意图见图 1。

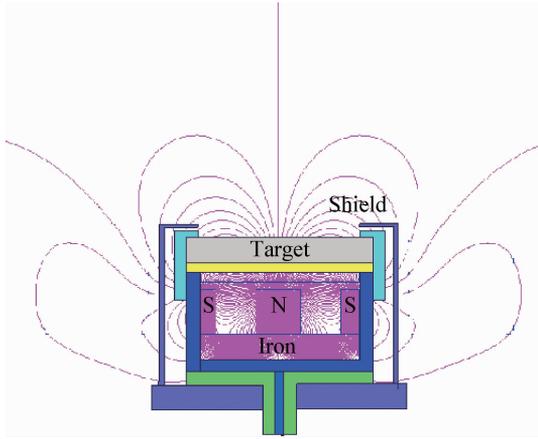


图 1 圆形平面磁控靶的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the circular magnetron sputtering target

由于圆形磁控靶的磁场分布相对于中心轴是圆周对称,因此只需对其一半进行模拟。假设坐标系是以磁控靶中心磁钢上表面圆心为原点,垂直靶面为 Z 方向,平行靶面为 R 方向。采用有限元法中的 POISSON SUPERFISH 分析模拟磁控靶和外加电磁线圈的磁场分布。靶面磁场强度皆指距离磁钢上表面 1 cm 处的磁场感应强度,相应磁控靶的模拟磁路分布如图 2 所示。

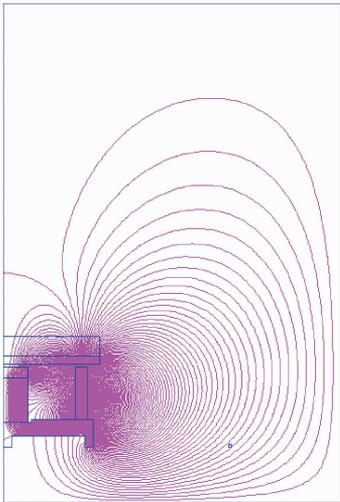
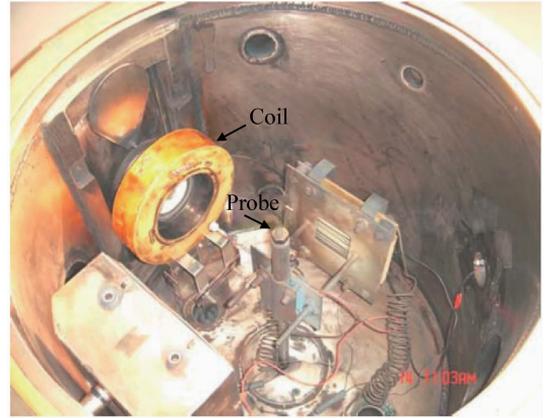


图 2 磁控靶有限元模拟磁路分布图

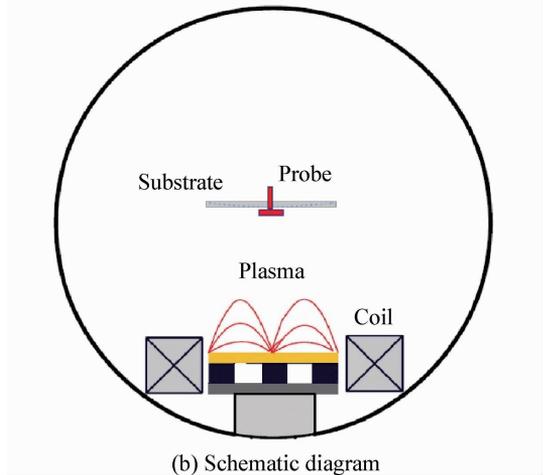
Fig. 2 Magnetic field configuration of the circular magnetron sputtering target by FEM

电磁线圈采用聚酰亚胺漆包铜线缠绕,约 850 匝,当通以 2 A 的直流电流时,线圈中心产生强度约 100 Gs 的磁场。采用 Langmuir 探针获取薄膜沉积过程中基片区域粒子的能量及流量

分布等离子体参数,以 J_i/J_n 比值参数来表征粒子流量,其中 J_i 是由 Langmuir 探针测得的离子电流密度, J_n 则根据沉积速率、薄膜密度、原子量计算出来。外加电磁线圈的磁控溅射系统及其示意图如图 3 所示。



(a) Actual photo



(b) Schematic diagram

图 3 外加电磁线圈的磁控溅射设备

Fig. 3 Magnetron sputtering system with external coil around circular planar target

1.2 外加电磁线圈对等离子体辉光变化和磁控靶非平衡度的影响

外加电磁线圈产生的磁场可以显著地影响基片处的离子轰击强度。图 4 是当电磁线圈通以不同大小和方向的电流时,基片区域的等离子体辉光变化。其中,溅射电压为 320 V、靶基距为 7 cm,工作压强为 0.8 Pa,外加线圈与靶材的距离 (Z_{coil}) 为 1 cm。图 5 是当电磁线圈通以不同大小和方向的电流时,基片离子流密度 J_i 以及磁控靶的非平衡度 K_G 。

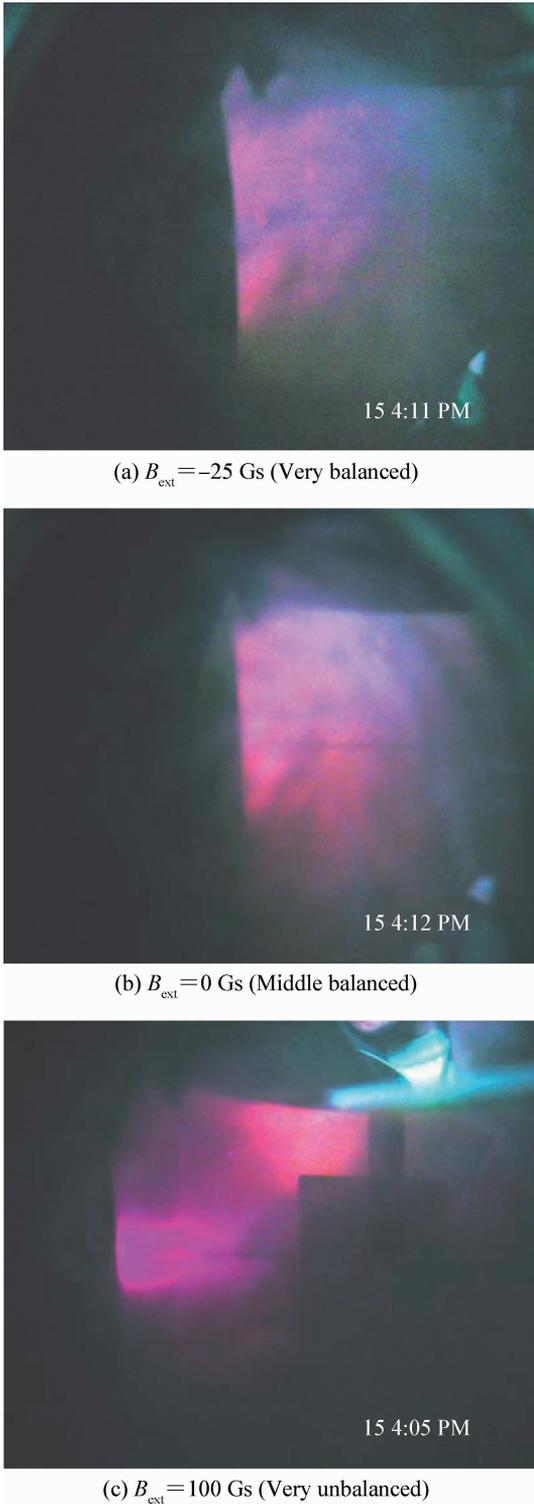
(a) $B_{\text{ext}} = -25$ Gs (Very balanced)(b) $B_{\text{ext}} = 0$ Gs (Middle balanced)(c) $B_{\text{ext}} = 100$ Gs (Very unbalanced)

图4 外加线圈电流对磁控等离子体辉光变化的影响
Fig. 4 Effects of the current of external coil on the glow discharge of magnetron systems

(1)当线圈磁场 $B_{\text{ext}} = -25$ Gs(对应线圈电流为 -0.5 A)时,磁控靶的几何非平衡系数 $K_G = 2.3$,对应于极端平衡态,磁力线是闭合在靶面之

前,电子基本被约束在靶面附近,基片附近辉光相对暗淡和均匀,此时 J_i 约为 0.1 mA/cm²。

(2)当线圈磁场 $B_{\text{ext}} = 0$ Gs时,磁控靶的 $K_G = 1.5$,对应于中等平衡态,绝大部分磁力线闭合在靶面前,但小部分略微发散,大部分电子被约束在靶面附近,基片附近辉光相对更明亮,等离子体密度相对有所增加, J_i 较之前增加了1倍。

(3)当线圈磁场 $B_{\text{ext}} = 100$ Gs时,磁控靶的 $K_G = 1.0$,对应于极端非平衡态,相当一部分磁力线不再闭合于靶面,而是严重发散,辉光柱明显闪亮,电子随着磁力线螺旋运动漂移至基片附近,基片处等离子体密度显著增加,由图4也可以看出, J_i 相对于线圈电流为 0.5 A时增加了9倍。关于基片离子流密度 J_i 的增加, Ivanov 等人的解释如下^[1]:随着外加线圈磁场 B_{ext} 强度(与磁控靶外磁极同向)的增加,磁力线趋向于发散,延伸至基片区域,相应更多的电子沿着磁力线螺旋漂移到基片区域,而基片处更高的电子密度又离子化了更多的气体,从而提高了离化率。

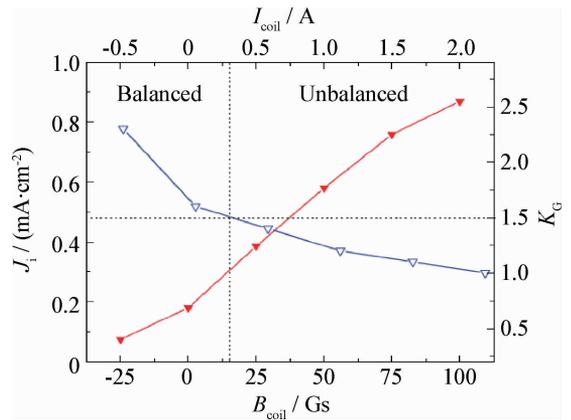


图5 外加线圈磁场 B_{ext} 和电流 I_{coil} 对 J_i 和 K_G 的影响 ($Z_{\text{coil}} = 1$ cm)

Fig. 5 J_i and K_G as a function of B_{ext} as well as I_{coil} of external coil ($Z_{\text{coil}} = 1$ cm)

1.3 线圈位置对等离子体特性的影响

除了磁场强度外,线圈位置也显著地影响磁控靶和基片区域磁场位形。磁场位形 FEM 模拟分布如图6所示^[13]。由图6可知:随着电磁线圈沿 Z 轴方向移动,对靶面(离磁钢上表面 1 cm)磁场强度/磁场位形分布的影响不大,即对磁控靶的阻抗特性影响较小;但是对基片区域磁场分布有较大影响,即对基片区域等离子体电流密度影响较大。由图可以看出:随着电磁线圈的移动,基片区域的磁力线密度和强度皆有所增加。

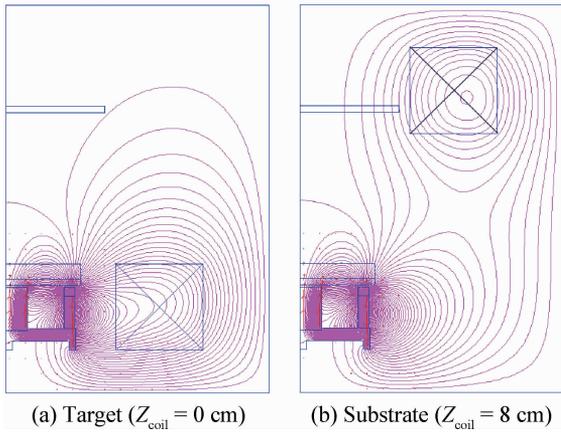


图 6 线圈分别位于磁控靶和基片区域时磁场地形模拟图 ($B_{ext} = 100$ Gs)^[13]

Fig. 6 Simulations of the magnetic field configuration for the coil situated in the vicinity of the target and substrate^[13]

线圈位置也显著地影响着基片区域的等离子体参数(见图 7)^[13]。图 7(a)是电磁线圈位于 $Z_{coil} = 0$ cm 位置时 J_i 和悬浮电压 V_f 随外加磁场 B_{ext} 的变化曲线。

随着线圈磁场 B_{ext} 由 -25 Gs 增加到 100 Gs (对应着线圈电流由 -0.5 A 向 2 A 变化), 基片处探针电流密度 J_i 由 0.1 mA/cm² 升至 0.9 mA/cm², 同时基片悬浮电压 V_f 也由 -8 V 降到 -23 V。图 7(b)是电磁线圈位于 $Z_{coil} = 8$ cm 位置时的变化曲线, 外加磁场 B_{ext} 在同样范围内变化, 基片离子流密度 J_i 由 0.2 mA/cm² 升至 1.8 mA/cm², 相较线圈位于 $Z_{coil} = 0$ cm 位置时基片最大离子电流 J_i 变化值几乎增加一倍; 同时基片悬浮电压在 $-23 \sim -5$ V 之间变化。此外, 无论电磁线圈放置在磁控靶或基片区域, 在 $0.4 \sim 0.8$ Pa 的范围内工作压强对两者的影响不甚明显, 当压强较低时饱和离子电流和基片悬浮电压略高。

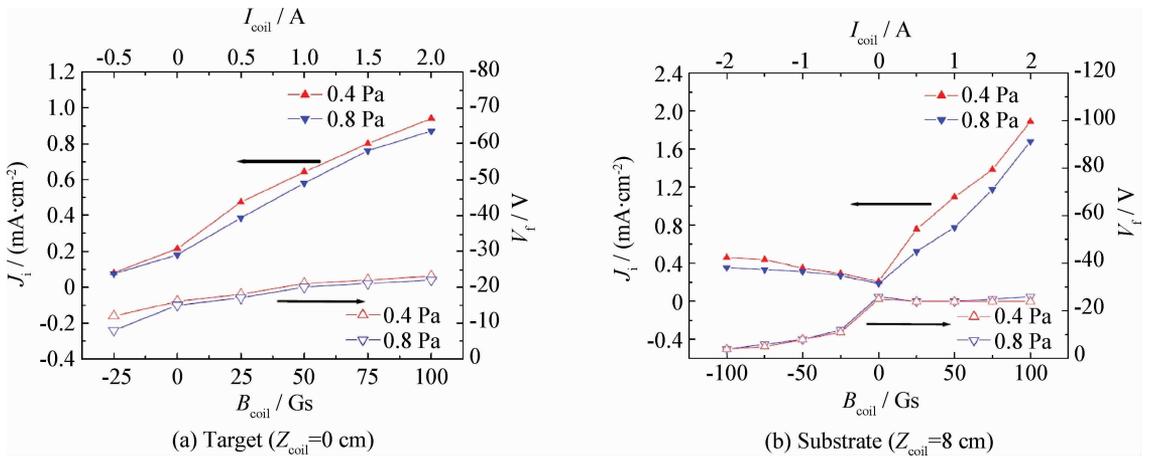


图 7 线圈位于靶材和基片时 J_i 和 V_f 随外加线圈磁场 B_{ext} 和电流 I_{coil} 的变化^[13]

Fig. 7 J_i and V_f as a function of B_{ext} as well as I_{coil} at target and substrate^[13]

1.4 线圈位置对靶材利用率的影响

由于磁控靶面闭合磁场的分布特征决定了在靶面上形成特定等离子体刻蚀的位形, 因而在靶材表面上会形成跑道状的刻蚀区。刻蚀跑道的形状与靶面磁场分布紧密相关。由于电子在正交磁场 ($E \times B$) 作用下的漂移运动主要发生在磁力线平行于靶面区域, 磁场水平分量 B_r 最大而垂直分量 B_z 为零的那一点对应着刻蚀跑道最深点^[14]。因此, 设计中应该使靶面磁力线的水平分量尽可能的均匀分布于靶面, 以获得较高的靶材利用率。刻蚀跑道截面轮廓可以半定量地以靶面鞘层处 (Ar 离化碰撞区域) 的 $|B_z/B|$ 的径向

分布来模拟计算^[15]。其中鞘层的厚度取决于等离子体密度, 对于常规磁控溅射辉光等离子体通常在 $1 \sim 2$ mm 以内, 这里取 $Z = 1$ mm 时的值^[14]。对外加电磁线圈磁控靶系统进行磁场分布的有限元模拟, 结果如图 8 所示^[13]。

图 8(a) 是当线圈位于磁控靶附近 ($Z_{coil} = 1$ cm) 施加不同外加磁场 B_{ext} 时, 靶面 $Z = 1$ mm 处磁场 $|B_z/B|$ 分布图。可以看出: 当磁场 B_{ext} 由 -150 Gs 向 150 Gs 改变时, 尽管在不同外加磁场下, $|B_z/B|$ 轮廓的形状大小和绝对值基本没有改变, 但轮廓整体相对地沿靶平面 R 方向, 由外磁极向内收缩或向外扩张移动相当一段范围。

这是由于在外加磁场与磁控靶原始磁场的耦合作用下,靶面闭合磁场被推向外磁极或向内磁极压缩的结果。这意味着靶面局域强等离子体会随之在靶面内外移动,扩大刻蚀跑道的面积。此外值得强调的是:当改变外加磁场 B_{ext} 时,刻蚀沟道最深点(对应于磁场水平分量 B_r 最大而垂直分量 B_z 为零的那一点)也沿着靶面径向移动。由于靶材刻蚀沟道的最深点决定着靶材的使用

寿命,如图 8(a)所示, $|B_z/B|$ 形貌的最深点在 $R=15\sim 25$ mm 之间变换,这意味着靶材寿命和利用率可以得到显著提高。

线圈位置也显著地影响 $|B_z/B|$ 的轮廓分布。比较图 8(a)(b)可以看出:当线圈由磁控靶附近($Z_{\text{coil}}=1$ cm)移到基片附近后($Z_{\text{coil}}=6$ cm), $|B_z/B|$ 轮廓最深点的移动范围显著下降(从 10 mm 降到 3 mm)。

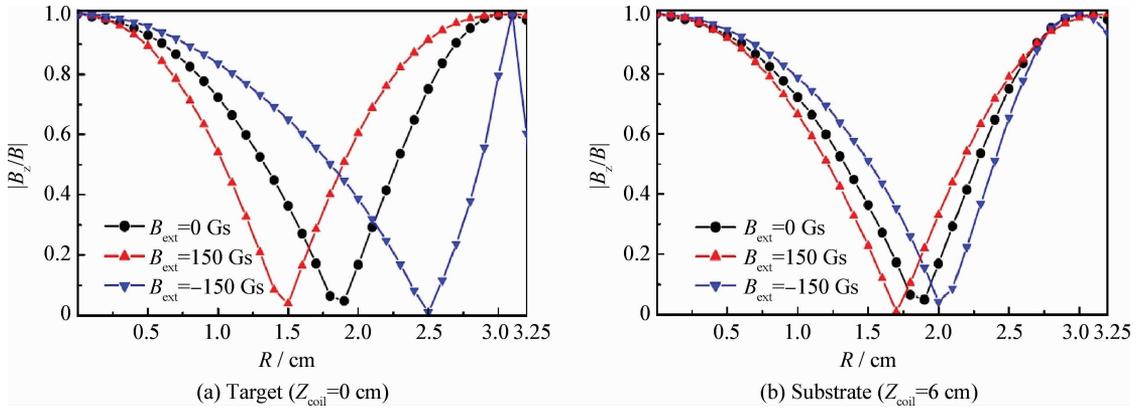


图 8 不同外加磁场时靶面($Z=1$ mm) $|B_z/B|$ 的轮廓分布图^[13]

Fig. 8 $|B_z/B|$ profiles of the magnetic field at $Z=1$ mm under different B_{ext} ^[13]

2 磁场模拟在阴极弧离子镀弧源优化设计和降低 TiN 薄膜大颗粒污染中的应用^[16]

大量真空阴极电弧的物理试验结果表明:不同磁场分量对阴极弧斑的运动影响规律不同,见图 9。在横向磁场作用下,阴极弧斑轨迹呈逆安培力反向运动^[17-20](图 9(a)),弧斑的运动速度和横向磁场的强度成抛物线关系^[21-22],可通过提高横向磁场的强度来增加弧斑的运动速度;在尖角磁场作用下,弧斑除反向运动外还向锐角方向作漂移运动,遵循锐角法则(图 9(b)),可用来限制弧斑的运动方向,控制弧斑在靶面上出现的位置。其他常见的磁场方式还有轴向(图 9(c))和拱形磁场(图 9(d))。以上这些磁场分布可以实现对弧斑的有效控制,限制弧斑的运动轨迹。但还未能有效地改善弧斑的放电形式,从而影响了大颗粒的完全消除。且弧斑被限制在一定的位罝处(图 9(e)(f)),长时间刻蚀会在靶面形成刻蚀轨道,浪费靶材。因此,作者采用了轴对称磁场产生横向磁场分量以提高弧斑的运动速度,并在提高弧斑速度和放电稳定性的同时,采用动态旋转磁场扩大磁场横向分量的面积以达到扩大弧斑的刻蚀区域,提高靶材利用率,实现了新的弧斑放电形式,有效地分散了弧斑

放电的集中,抑制了大颗粒液滴的喷射。

2.1 轴对称磁场控制阴极弧离子镀弧源的设计与制作

目前阴极弧离子镀弧源的靶材后方常用永磁体产生磁场,其存在强度不易调节、容易退磁等缺点,因此,采用自行研制的中间固定的高导磁率镀镍纯铁的电磁线圈产生的可调节轴对称磁场^[23]。电磁线圈放于阴极弧离子镀的靶材后面(见图 10)^[24],通过调节线圈的电流大小调节磁场的强度。导磁环套在靶材周围,以提高靶面横向磁场分量的强度,提高弧斑的运动速度。

采用机械接触式引弧方式引燃弧斑。利用 FEM 对轴对称磁场的分布进行模拟,分析靶面不同磁场分量的分布规律;磁场的强度采用 SHT-V 型磁强计测量。主要测量靶材边缘上横向磁场的强度(0~35 Gs),用以分析轴对称磁场对弧斑运动以及薄膜性能的影响。采用 Ar 放电和 Ti 靶研究不同轴对称磁场横向分量条件下弧斑的运动行为,在观察窗口设置滤光镜,通过曝光时间为 0.001 s 的相机动态拍摄不同参数下的弧斑的运动情况,通过后处理软件随机提取出不同时刻的弧斑形貌图。

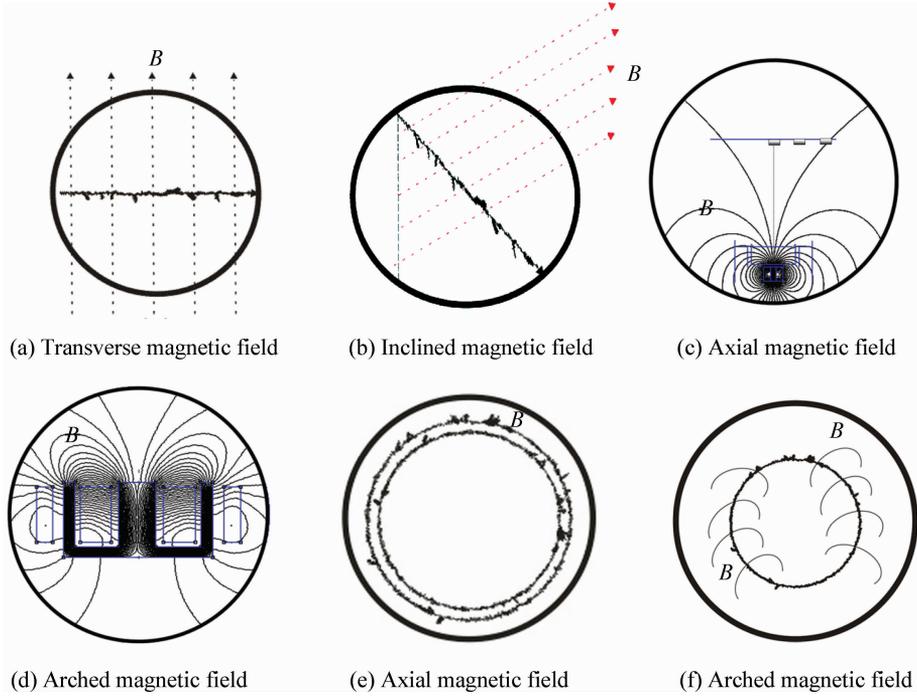


图 9 不同磁场位形下弧斑的运动轨迹

Fig. 9 Cathode spot movement orbit under different magnetic fields

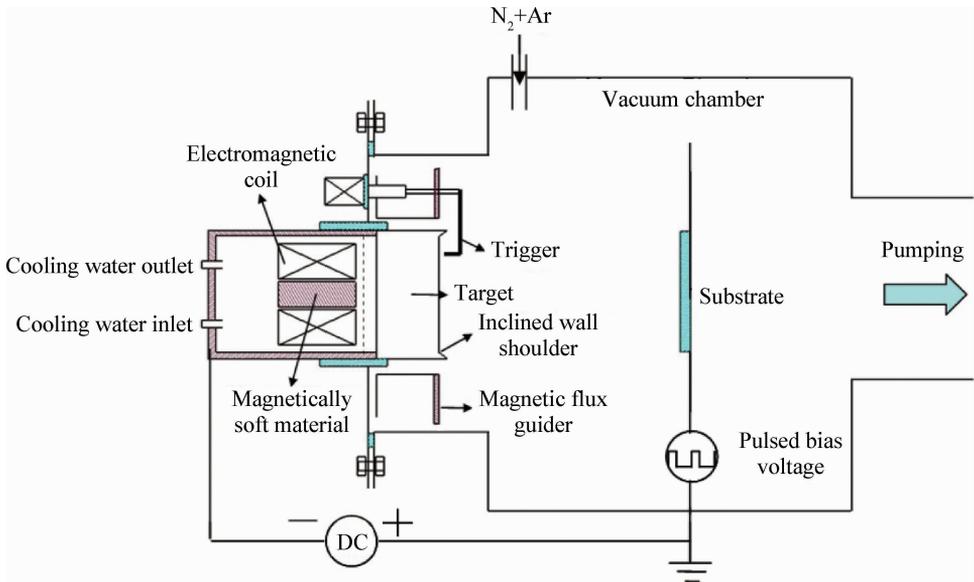


图 10 轴对称磁场辅助阴极弧离子镀设备^[24]

Fig. 10 Axisymmetric magnetic field assisted cathodic arc ion plating equipment^[24]

2.2 轴对称磁场的有限元模拟及其对弧斑运动的影响

图 11 是轴对称磁场的磁场位形及其分量在靶面的表面轮廓分布图。图 11(a)是有限元模拟得到的轴对称磁场的磁场位形,可以看出磁场在靶面呈轴对称分布,靶材附近的磁通密度较大,

远离靶材处的磁通密度逐渐下降。图 11(b)(c)分别是磁场的横向分量和纵向分量在靶面的表面轮廓分布图。由图可知:磁场的横向分量和纵向分量均在靶面呈轴对称分布,靶材中心的横向磁场强度为零,纵向磁场强度最大,但靶材边缘的横向磁场强度最大,纵向磁场强度最小。

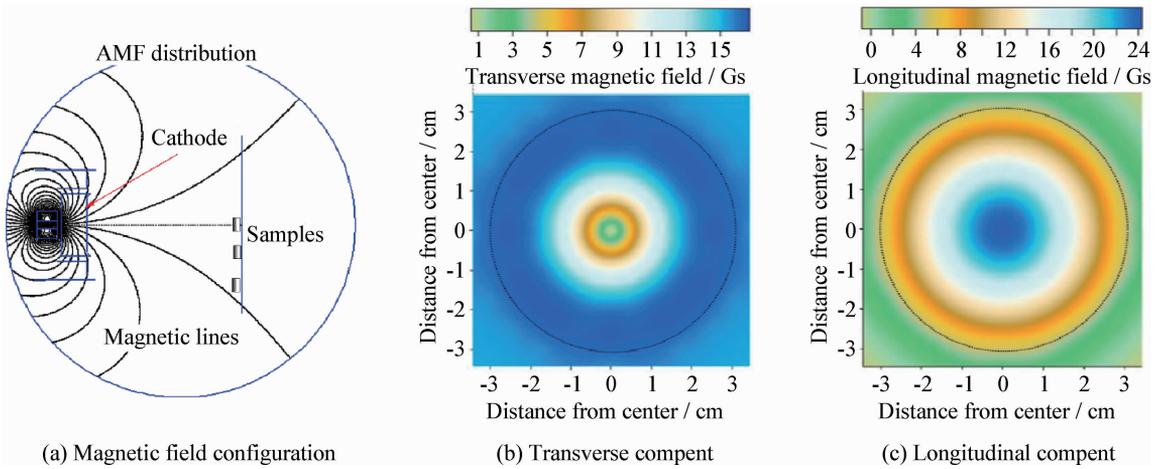


图 11 轴对称磁场的磁场位形及其分量在靶面的表面轮廓分布图^[23]

Fig. 11 Axisymmetric magnetic field configuration and surface contour maps of different magnetic field components^[23]

图 12 给出了不同横向磁场分量条件下弧斑运动的瞬态形貌, 试验采用的是 Ar 放电的 Ti

靶, 因此弧斑的颜色是蓝白色的。可以看出, 当轴对称磁场 (Transverse magnetic field, $TMF < 5$ Gs)

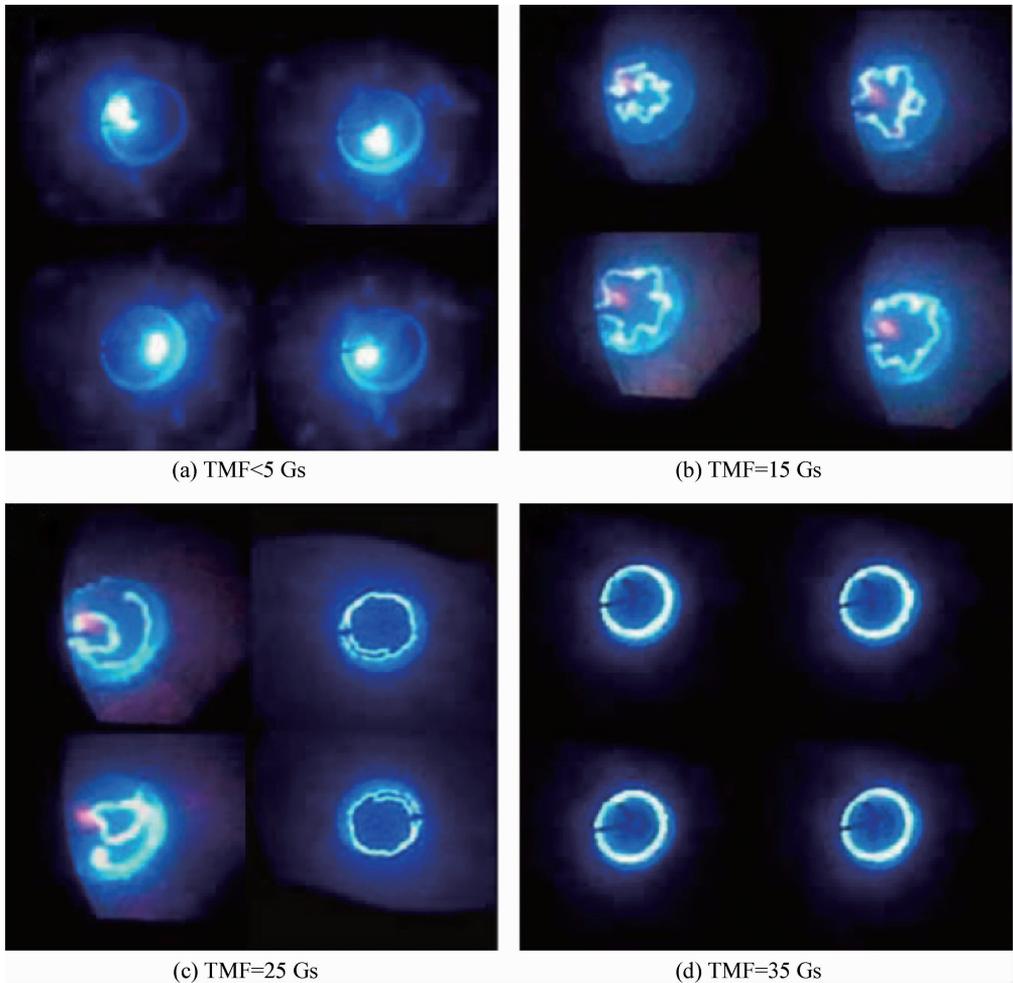


图 12 不同横向磁场分量条件下弧斑运动的瞬态形貌^[23]

Fig. 12 Transient morphologies of the cathode spots under different transverse magnetic fields^[23]

很弱的时候,弧电流集中在运动很慢的大弧斑处,并在靶面上呈无规则的随机运动,如图 12(a)所示;随着磁场强度的增加($TMF=15\text{ Gs}$),弧斑逐渐在无规则运动的同时,向靶面边缘扩展,呈菊花状扩展运动,弧斑运动速度加快,弧斑变细,如图 12(b)所示;当磁场增加到临界强度($TMF=25\text{ Gs}$)的时候,弧斑在靶材边缘快速稳定地旋转运动,且在靶材边沿斜面上上下抖动,弧斑分裂成 2~3 条细的圆斑线后向外呈螺旋状旋转扩展消失,如图 12(c)所示;当磁场强度足够大($TMF=35\text{ Gs}$)的时候,只在靶材边缘快速旋转运动弧斑线,靶面没有新的弧斑出现,见图 12(d)。

以上弧斑运动的示意图见图 13。在靶面磁场强度弱的时候,弧斑在靶面做随机运动(图 13(a));

随着轴对称磁场强度的提高,弧斑的旋转运动在锐角法则作用下向靶材边沿运动,弧斑的旋转运动轨迹不规则,呈菊花状的收缩运动(图 13(b));当磁场强度增加到一定值时,弧斑出现了明显的旋转运动,并扩展到靶材边缘且稳定地在靶材边缘快速旋转运动(图 13(c))。

弧斑在靶面的分布和运动对靶材的刻蚀影响显著,图 14 是阴极靶材在不同磁场条件下使用一段时间后的刻蚀形貌。在磁场较弱($TMF<18\text{ Gs}$)时,弧斑容易在靶材中心聚集,形成锥形的刻蚀坑,降低了靶材利用率,如图 14(a)所示。在磁场较强($TMF=30\text{ Gs}$)时,靶材边缘出现明显的刻蚀轨道,这不利于薄膜的均匀性沉积,如图 14(b)所示。

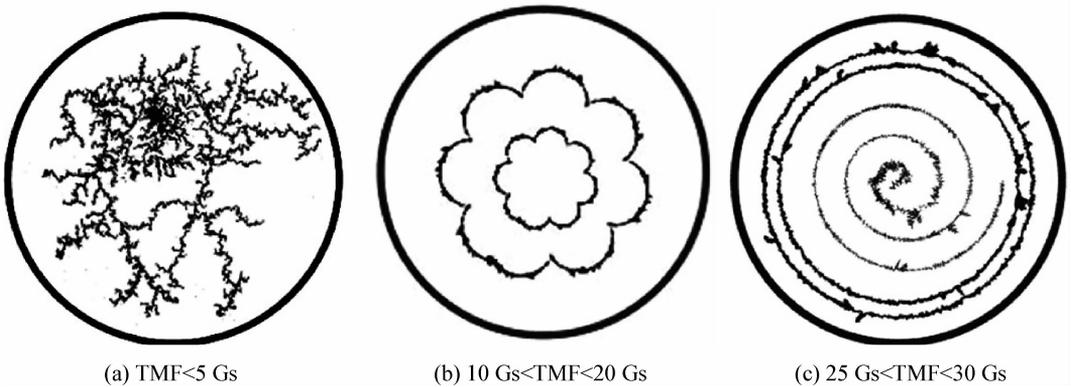


图 13 不同横向磁场条件下弧斑运动的示意图^[23]

Fig. 13 Schematic diagrams of the cathode spot movement under different transverse magnetic fields^[23]

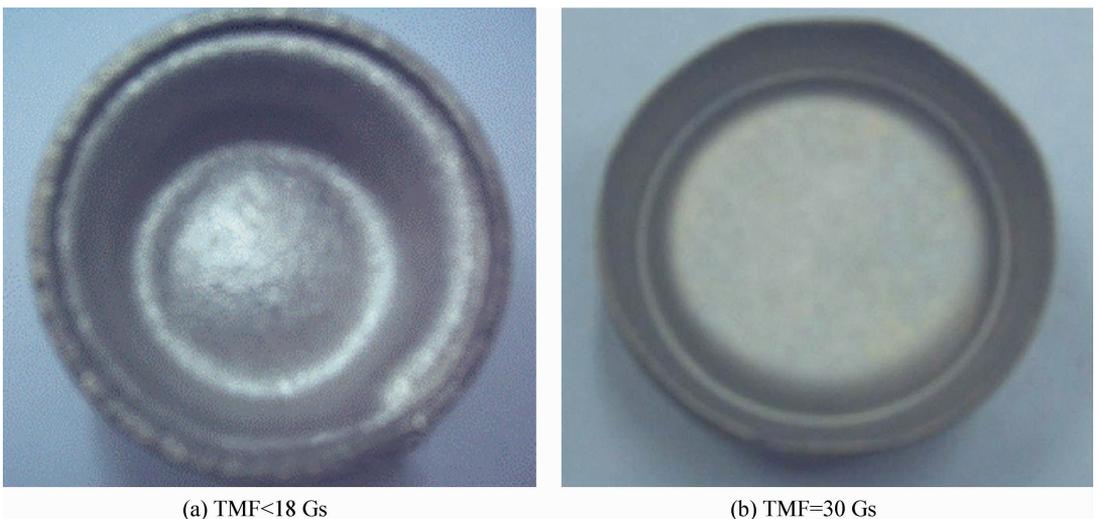


图 14 阴极靶材在不同磁场条件下使役一段时间后的刻蚀形貌^[23]

Fig. 14 Etching morphologies of the cathode after using a certain time at different transverse magnetic fields^[23]

2.3 轴对称磁场强度对薄膜表面大颗粒的影响

以 TiN 为研究对象考察轴对称磁场强度对薄膜表面大颗粒的影响,其沉积过程的工艺参数如下:电弧电压 20~30 V,电弧电流 50~60 A,工作压强 0.8 Pa(N_2 0.6 Pa+Ar 0.2 Pa)。图 15 给出了不同轴对称磁场横向分量条件下 TiN 薄膜的表面形貌。在磁场强度比较低的时候,沉积到薄膜表面的颗粒是较大的熔融态颗粒;而随着磁场强度的提高,大颗粒的数目和尺寸大为减少,沉积到薄膜表面的颗粒为小的固态颗粒。这是因为在磁场强度较低的时候,弧斑在靶面随机

运动,运动速度较慢,在靶面某点停留时间较长,斑点较大,形成较大的液态熔池面积,造成了大液滴喷射到基体上形成了较大的扁平状颗粒。而磁场强度较高的时候,弧斑在靶面快速地旋转运动,在靶材表面某点停留时间缩短,斑点尺寸细化分裂,斑点变小,因此只有比较细小的颗粒喷射出来沉积到基体上。

虽然通过这种磁场强度的提高可以减少颗粒,但大颗粒的减少程度并未达到制备精细薄膜的要求,因此作者开发了新型动态旋转磁场解决该问题。

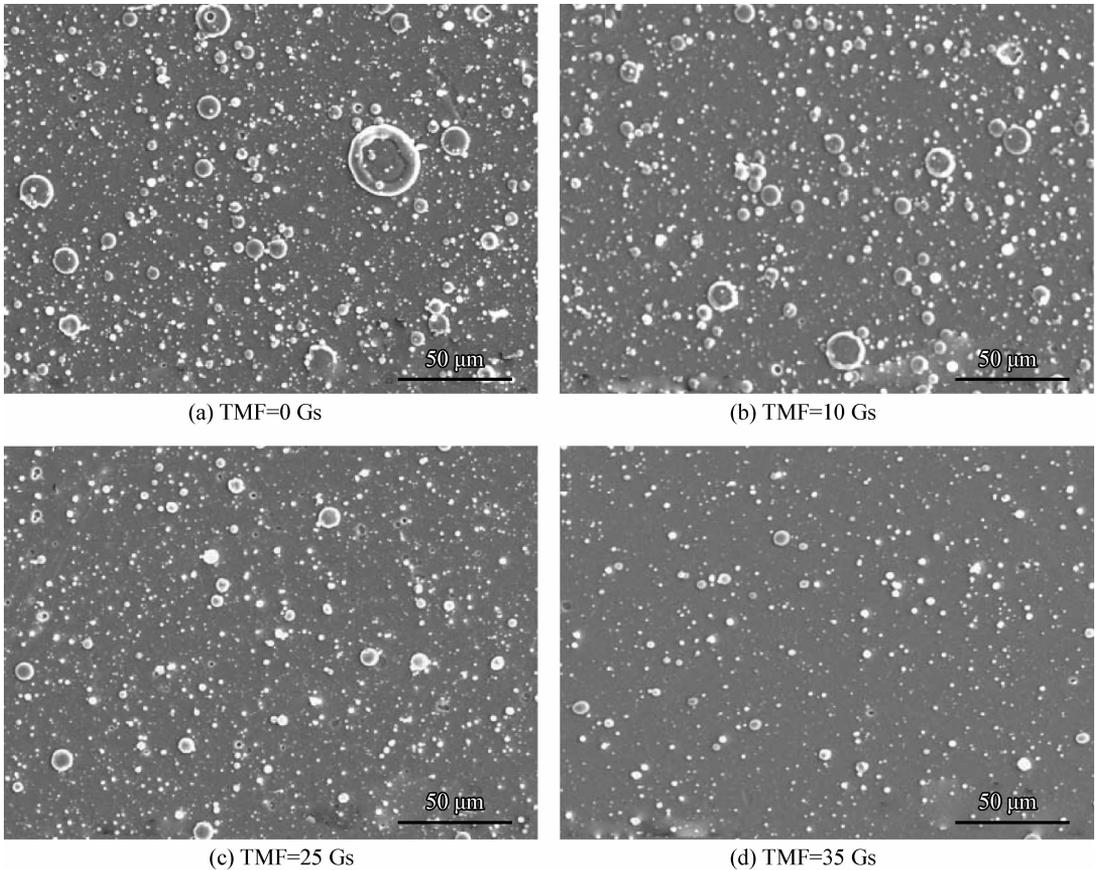


图 15 不同横向磁场分量条件下 TiN 薄膜的表面形貌^[25]

Fig. 15 Surface morphologies of the TiN films prepared under different transverse magnetic fields^[25]

2.4 旋转磁控弧源系统的设计与制作

所谓动态磁场就是动态地变换磁场在靶面的局域性分布,改变靶面磁场横向分量最大值的分布,扩大磁场横向分量的面积以达到扩大弧斑的刻蚀区域,提高靶材的利用率。但这种方法往往需要增加复杂的电磁或者机械控制机构;同时,磁场的位形、强度和频率难以调节,结构复

杂。因此,作者优化设计了特殊的外加电磁线圈用以产生覆盖整个靶面的动态旋转横向磁场,通过改变电磁线圈的频率和电流强度,实现了控制和调节弧斑的运动和放电稳定性。

图 16 为旋转磁场产生的原理图^[15,23]。一般情况下,在空间相差一定均匀角度的几个磁极($4n$ 或者 $3n$, $n \geq 1$),且磁极上装有几组(2 或者

3) 励磁线圈绕组, 当励磁线圈中通过几组相差一定相位(90° 或者 120°) 的励磁电流时, 这几个磁极所包围的空间内就会产生旋转磁场, 如图 16(a) 所示; 其中, 图中的 A、X、B、Y、C、Z 分别为三相交流电的首端和尾端。

图 16(b) 表示不同时刻磁场的分布图, 可以看出磁场随着电流的周期变化在不断地旋转。磁场的形态由励磁线圈的安装位置决定, 磁场的旋转频率取决于励磁线圈的励磁转换频率, 而场强的大小则由励磁电流的大小来调节^[27]。

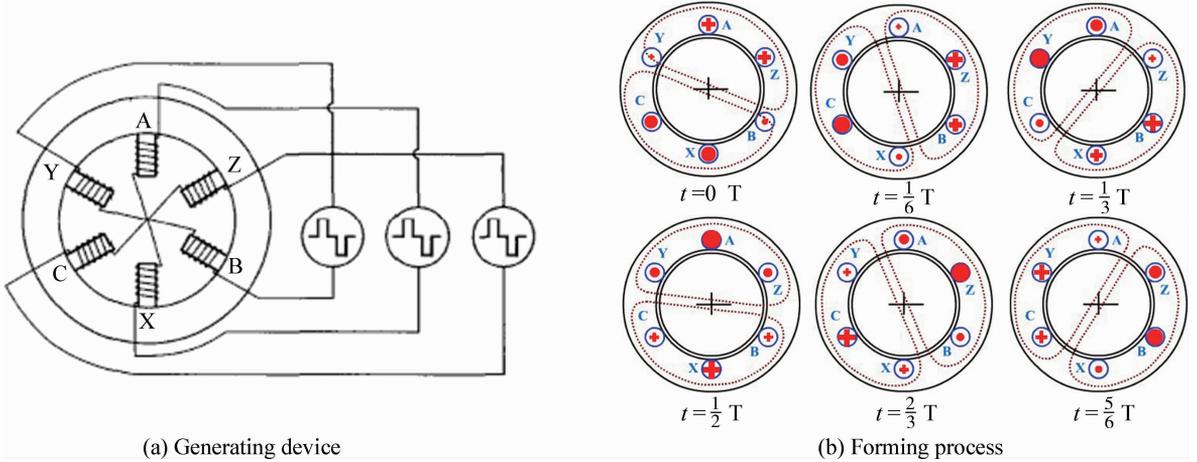


图 16 旋转磁场的原理示意图^[26-27]

Fig. 16 Schematic diagrams of the principle of rotating magnetic field^[26-27]

2.5 旋转磁场的模型与有限元模拟设计

图 17 是旋转磁场发生装置的一个结构模型。其中, 图 17(a) 为三相交流电流励磁的旋转磁场发生装置, 在真空室内圆柱靶材周围的屏蔽罩上均匀对称地安装 6 个方形导磁杆。导磁杆底端连接在导磁环上, 导磁杆与导磁环形成一个整体的电磁回路骨架, 骨架采用高磁导率的纯铁材料。与导磁杆个数相同的线圈安装在导磁杆的中间部分, 形状和导磁杆的形状一致, 线圈的线径、大小、匝数不受限制, 根据空间允许制作, 线圈的厚度小于磁极的长度, 线圈与骨架之间通

过绝缘保护。线圈采用 QZY-2 高温漆包线制作, 绝缘材料用 F 或者 H 级的耐高温材料。相对的导磁杆和线圈为一组, 6 个导磁杆空间位置相差 60° , 分为 3 组, 励磁线圈分别采用相位差为 120° 的三相正弦交流电源供电。

图 17(b) 为旋转磁场发生装置产生的瞬态磁场分布模拟图。可以看出这种形式的旋转磁场在靶面的分布不均匀, 磁极处的磁场强度大于靶材中心的磁场强度, 如果调解不好的话容易造成弧斑滞留在磁极位置附近, 造成放电集中导致更多颗粒的发射。

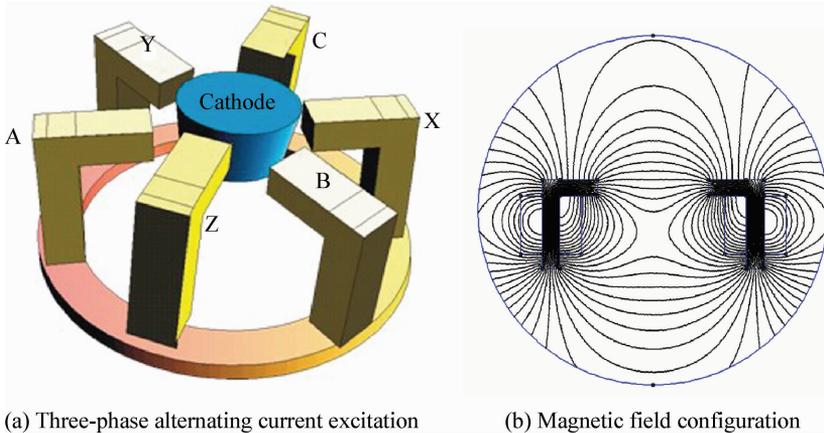


图 17 旋转磁场结构模型和磁场线形

Fig. 17 Structural model and configuration of the rotating magnetic field

图 18(a)是采用相位差 120° 的三相正弦交流电控制的旋转磁场发生装置的结构模型。旋转磁场发生装置与靶材同轴放置,位置可以调节,以靶面形成有效的旋转磁场区域为宜。旋转磁场发生装置的骨架有 24 个磁极和槽隙。骨架一般采用铁损小、导磁性能好、厚度为 $0.35\sim 0.5\text{ mm}$ 的硅钢片冲槽叠压而成,硅钢片的表面涂有绝缘漆,内圆表面冲有均匀分布的槽,绕组线圈(图 18(b))嵌放在槽隙中。槽形有开口、半开口、半闭口等形式(图中为开口)。将绕组图 18(b)嵌入图 18(a)所示的骨架中,绕组嵌线的形式很多,在槽隙的布置可以

采用单层、双层、单双层混合等布置;绕组端部的接线方式可以采用叠式或者波式;绕组的端部形状可以采用链式、交叉式、同心式以及叠式等。不同的嵌线方式可以产生不同极数(2、4、6 和 8 极)和形态的旋转磁场。根据旋转磁场发生的原理,当三相绕组中通入三相对称电流时,在旋转磁场发生装置的骨架内就会产生一个旋转磁场,当三相对称电流完成一个周期(对 2 极磁场而言)的变化时,它们所产生的合成磁场在空间旋转了一周,三相电流随时间周而复始的变化,而由三相电流所产生的合成磁场也就会不停地旋转。

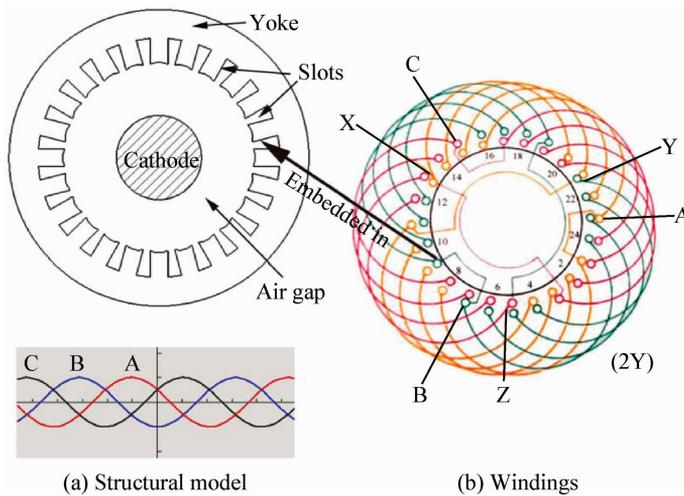


图 18 三相多磁极旋转磁场发生装置的结构模型^[26]

Fig. 18 Structural model of the rotating magnetic field generating device with “three-phase multi-magnetic poles”^[26]

图 19 是旋转磁场发生装置在一个电流周期内不同时刻的瞬态磁场分布模拟图。可以看出随着电流周期性的变化,在骨架的空间内可以产生非常均匀、形态不变的旋转磁场。由于旋转磁场发生装置与靶材同轴,产生的磁场为均匀的完全覆盖并且平行于整个靶面的旋转横向磁场,且速度和强度可调节,因此能够使弧斑在整个靶面上螺旋运动,其速度可由磁场的旋转速度和磁场的大小调节控制,实现了弧斑在整个靶面的刻蚀运动,提高了靶材刻蚀的均匀性和利用率;同时有效地改善了弧斑的放电形式,如果控制得当,可以实现新的放电形式,有效地分散了放电的集中,减少了液滴大颗粒的发射。

图 20 是旋转磁场控制的阴极弧离子镀沉积设备示意图。该设备主要包括圆形靶材、旋转磁场装置、引弧线圈、绝缘套、空心法兰、引弧针、螺栓、真空室等。引弧线圈带动引弧针与靶材接触

进行引弧;旋转磁场发生装置套在围绕于靶材之外的空心法兰上,法兰通过进水管、出水管进行冷却水循环;旋转磁场发生装置与法兰之间安装绝缘套,法兰与靶材底座和真空室之间通过螺栓连接。

2.6 低频旋转磁场对弧斑运动形貌和薄膜表面大颗粒的影响

图 21 给出了频率为 10 Hz , 磁场电流分别为 $0, 3, 6$ 和 9 A (对应不同的磁场强度)条件下的弧斑的瞬态形貌。采用 Ar 放电的 Ti 靶,因此弧斑的颜色为蓝白色。可以看出,旋转横向磁场强度为零,由于电弧本身产生的自磁压缩,弧斑呈聚集的大斑点在靶面上随机运动。随着横向磁场强度的增加,弧斑形貌由聚集的明亮大斑点逐渐转变为较为平直的长细线,而且磁场强度越大,弧斑轨迹线越长越细而且波折越多。但是由于横

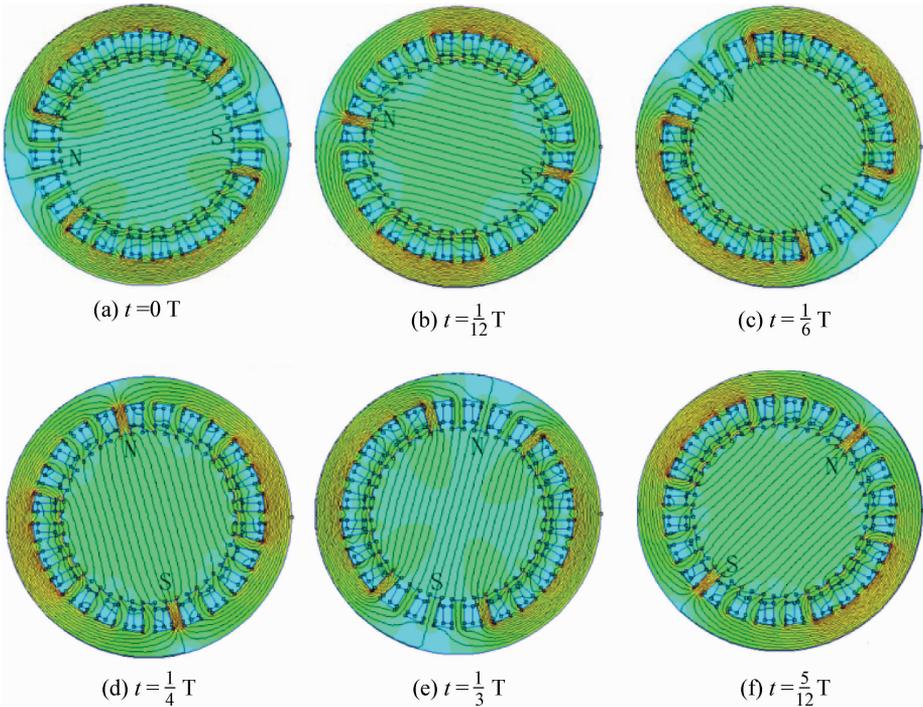


图 19 一个电流周期内不同时刻的瞬态磁场分布模拟图^[26]

Fig. 19 Transient distribution diagrams of the magnetic field at one current cycle^[26]

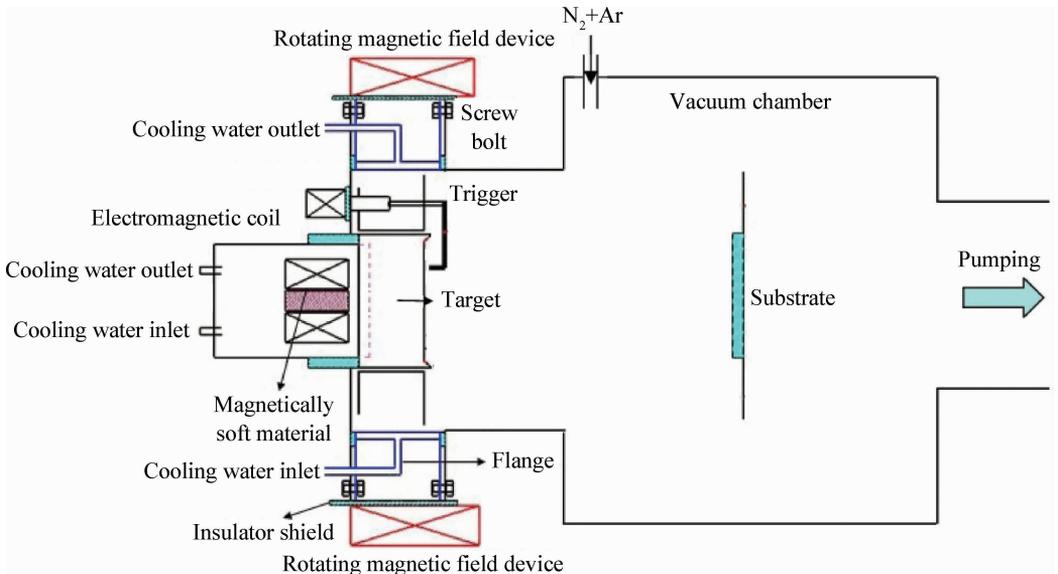


图 20 旋转磁场控制阴极弧离子镀沉积设备示意图

Fig. 20 Schematic diagram of the cathodic arc ion plating deposition device controlled by rotating magnetic field

向磁场的旋转,造成了弧斑的轨迹略有弯曲和波折,在磁场强度比较大的时候,弧斑直线运动到靶材的边缘后在方向变化的横向磁场作用下也改变了运动的方向。由于弧斑的运动速度较快,磁场的旋转频率较低,旋转频率对弧斑的运动影响

还比较小,而磁场的强度影响更大一些,因此弧斑的形貌只是在随着横向磁场的低频旋转作简单的直线性弯折运动。弧斑的放电方式并没有发生大的变化,只是运动速度随着磁场强度的增加变快,在一点的停留时间变短,弧斑变细。

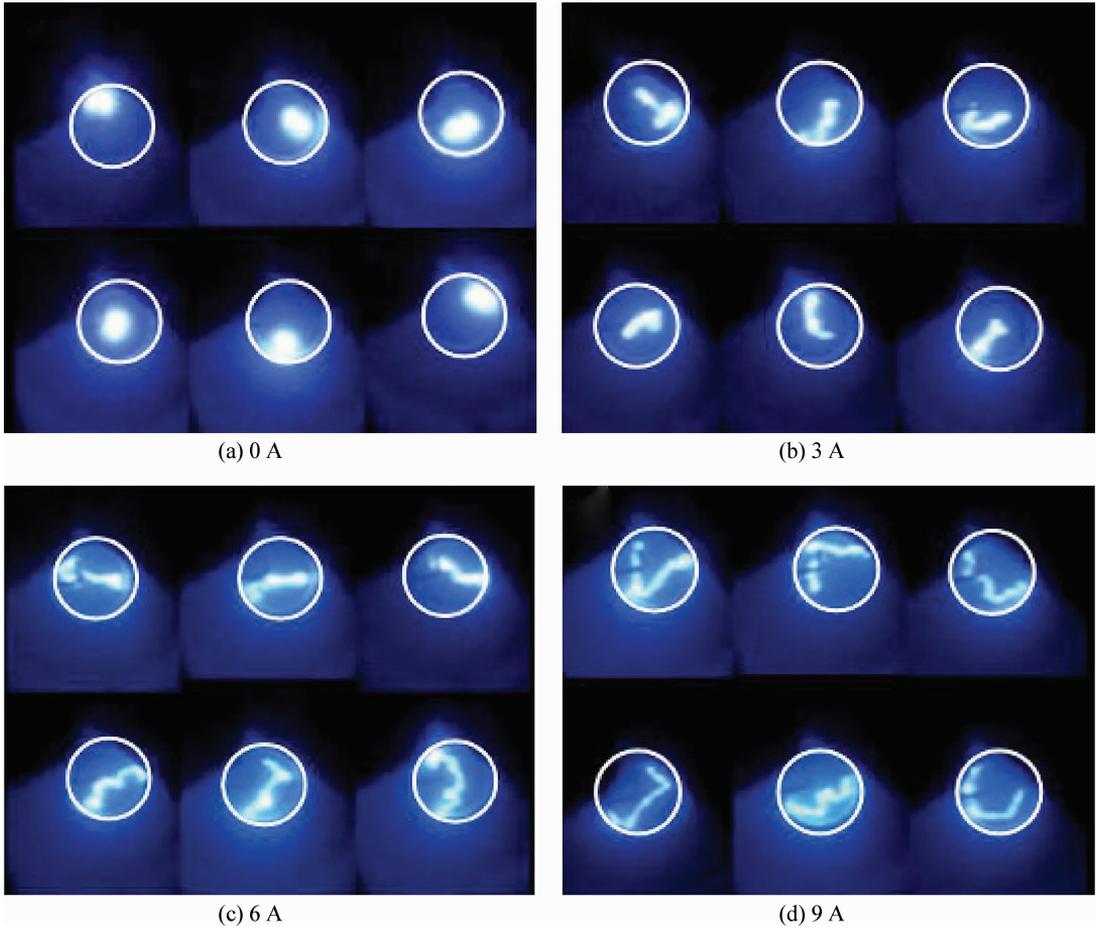


图 21 低频旋转横向磁场条件下弧斑的瞬态形貌(10 Hz)

Fig. 21 Transient morphologies of the cathode spots under low-frequency rotating transverse magnetic field

图 22 给出了频率为 20 Hz, 磁场电流分别为 0、3、6 和 9 A (对应不同的磁场强度) 条件下的 TiN 薄膜的表面形貌。可以看出: 随着横向磁场强度的增加, 薄膜表面的大颗粒的数目和尺寸大大减少。在横向磁场强度比较低的时候, 沉积到薄膜表面的颗粒大部分是比较大的扁平状熔融态颗粒; 而随着磁场强度的提高, 尺寸大的颗粒大幅度减少, 在横向磁场强度比较大的时候, 沉积到薄膜表面的颗粒大部分是小的固态颗粒。薄膜表面的颗粒数目、形貌和弧斑的运动密切相关, 在没有横向磁场的时候, 磁场对弧斑的运动影响小, 弧斑在靶面随机运动, 运动速度比较慢, 在一点停留的时间长, 弧斑的斑点很大, 电流密度比较集中, 使弧斑下的阴极靶面温度极高, 造成靶面的局部熔化, 因此形成的液态熔池面积也比较大, 从而造成了大量的大液滴喷射, 附着到基体上冷却后形成了比较大的扁平状颗粒。随着横向磁场强度的增加, 弧斑线变长变细, 弧斑的直线运动速度加快, 在一点的

停留时间缩短, 减少了等离子体与液态熔池的反应时间, 因此, 喷射出的颗粒尺寸和数目都大大地减少。横向磁场强度的增加加快了弧斑的运动速度, 减少了弧斑的尺寸(弧斑线细化)和在一点的停留时间, 从而导致了更少、更小的颗粒发射, 降低了大颗粒的污染程度。

2.7 变频旋转磁场对弧斑运动形貌和薄膜表面大颗粒的影响

图 23 给出了不同频率(90、150 和 210 Hz)、不同磁场电流(2、6 和 11 A) 条件下弧斑的瞬态形貌(N_2 放电, Ti 靶)。从图 23 可以看出: 不同频率和强度的旋转横向磁场条件下弧斑的形貌、颜色和强度变化很大。可以看出在磁场强度比较低、也就是横向磁场强度起作用比较小的时候, 弧斑的定向运动趋势必定会比较弱, 如果是没有旋转频率的影响, 弧斑将会呈现出随机运动速度很慢的电流集中的明亮大斑点。但是, 随着磁场旋转频率的增加, 弧斑从聚集的大斑点逐渐

变成不规则的、比较粗糙的团絮状,同一瞬态在靶面上覆盖的面积也变大,说明弧斑运动的位置更多,在同一位置停留的时间变短,弧斑电流密度有所分散。比较图 23(a)~(f)可以看出:在相同的较高磁场旋转频率下,随着横向磁场强度的增

加,弧斑逐渐从面积比较小的团絮状成比例地分散开来,横向磁场对弧斑的定向运动速度的提高又有很大的作用,在高频旋转的复合作用下,弧斑在靶面上分布的范围更加大,同一时刻运动的区域更加分散,电流密度降低很多。

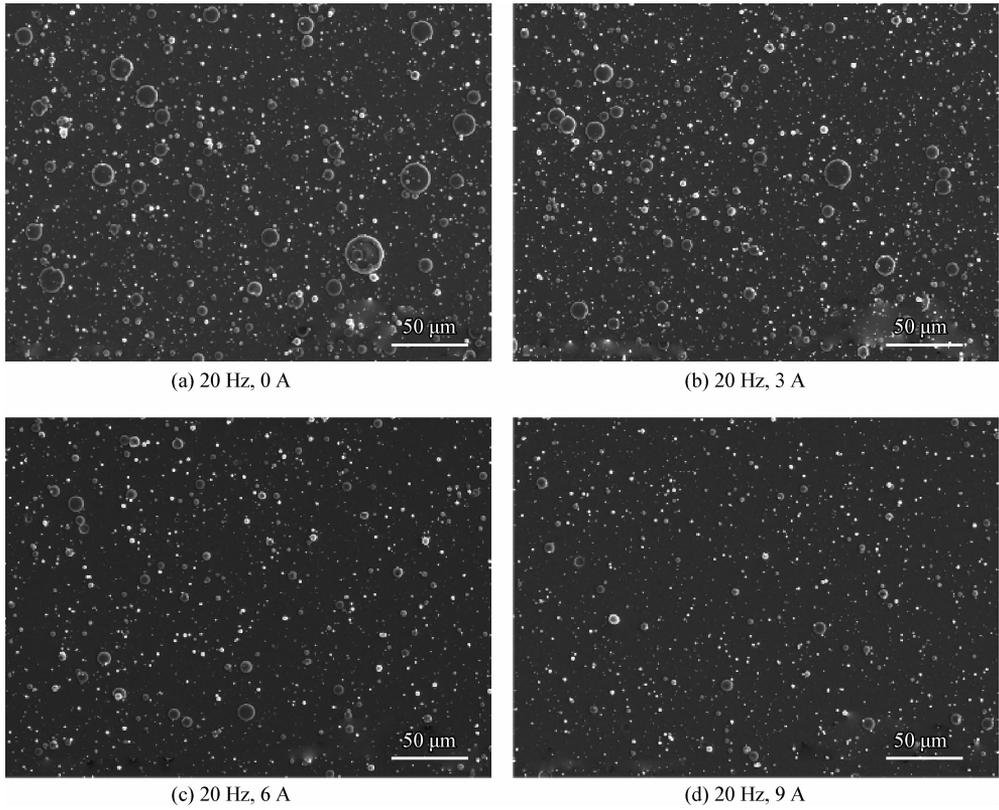


图 22 低频(20 Hz)旋转磁场条件下薄膜的表面形貌

Fig. 22 Surface morphologies of the films prepared under low-frequency(20 Hz)rotating magnetic field

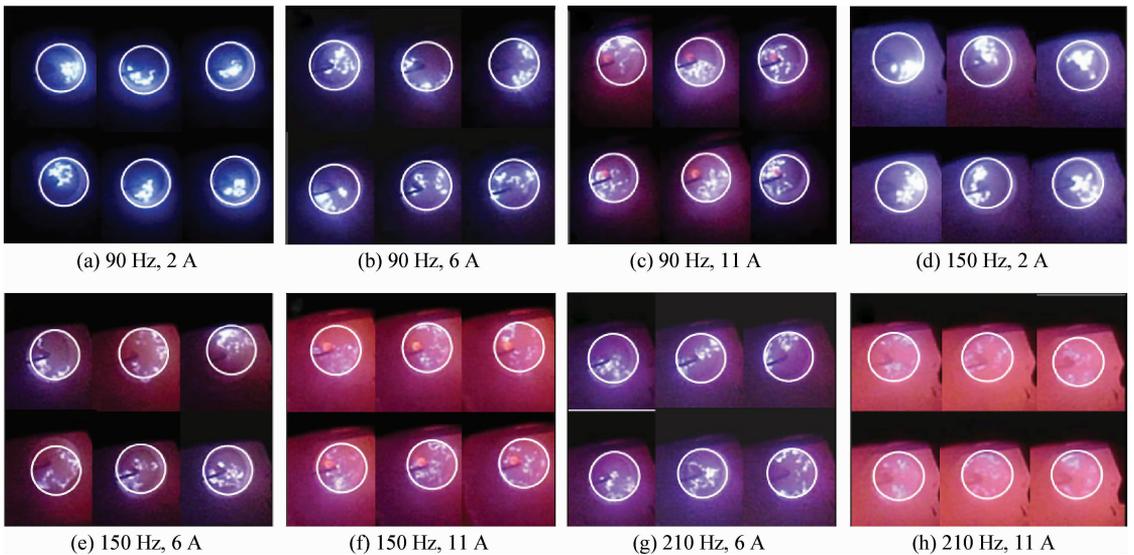


图 23 不同频率和强度的旋转横向磁场条件下弧斑的瞬态形貌

Fig. 23 Transient morphologies of the cathode spots under different frequencies and intensities of the rotating transverse magnetic fields

不论横向磁场强度增加,还是强度不变旋转频率增加,弧斑的形貌都有很大变化,不再是聚集的斑点或者定向运动的直线,而是在横向磁场强度和旋转频率的综合作用下,呈现出分散弧斑的形貌。随着横向磁场强度和旋转频率的增加,弧斑在靶面上分散的趋势更大,逐渐从聚集的斑点态(或者弱分散的团絮态)转变为大面积分布在靶面的较强的分散弧斑絮线,最后变化为完全分布在整个靶面的强分散弧斑线,弧斑分裂强烈,同一时刻,运动范围分布在整个靶面,使得整个靶面加热均匀,电流密度急剧降低。这个状态下的电弧放电机制必然是热致电子发射的作用大于场致发射,由于弧斑的强分散,电流密度的急剧降低,如果要维持电弧稳定的自持放电,当然需要有电场强度的提高来弥补。

因此,作者根据大量试验结果分析,将弧斑的运动大致分为3种不同的状态:Ⅰ态——低横向磁场强度下的聚集斑点态(或者弱分散的团絮态);Ⅱ态——大面积分布在靶面的半分散弧态;Ⅲ态——完全分布在整个靶面的强分散弧态。

从图23可以看出在频率比较低(90 Hz)的时候,随着横向磁场强度的增加,弧斑从Ⅰ态转变为Ⅱ态而不出现Ⅲ态(实际上是有Ⅲ态出现,只不过需要的时间很长);而在高的旋转频率(150 Hz和210 Hz)下,随着横向磁场强度的增

加,弧斑从Ⅰ态转变为Ⅱ态然后变化为Ⅲ态,但是不同的频率下各个状态出现的时间不一样,其中Ⅱ态是随着磁场强度的变化同步出现的,而Ⅲ态则不同,频率越高,随着横向磁场强度的增加Ⅲ态越容易出现。说明弧斑运动状态的转变是旋转磁场频率和强度共同作用的结果,没有频率的作用,只增加横向磁场的强度,弧斑呈现的是斑点到直线状态的变化;没有横向磁场的作用,只增加频率,弧斑呈现的是斑点到团絮的变化;只有二者综合作用,在高旋转频率下增加磁场强度,或在高的磁场强度下增加旋转频率才更容易出现弧斑完全分布在整个靶面的强分散弧态。

强分散弧态是电弧状态的一种,一般在热阴极靶材上,主要是以热电子发射,这种电弧形态由于电流密度分散,不会形成一点聚集的电流集中从而导致大的液态熔池的出现,因此几乎没有大颗粒的喷射。而对于冷阴极靶材来说,更有利的电弧自持放电是场致电子发射机制导致的电流聚集的弧斑斑点放电;而以往不同类型的磁场的作用,只是区域性的改变弧斑的位置,提高弧斑的运动速度尽量减少弧斑在一点的停留时间以减少颗粒的发射。而旋转横向磁场利用横向磁场的强度和旋转频率的综合作用,在冷阴极靶材上实现了完全分布在整个靶面的强分散弧态。

图24给出了对应不同弧斑状态的不同参数

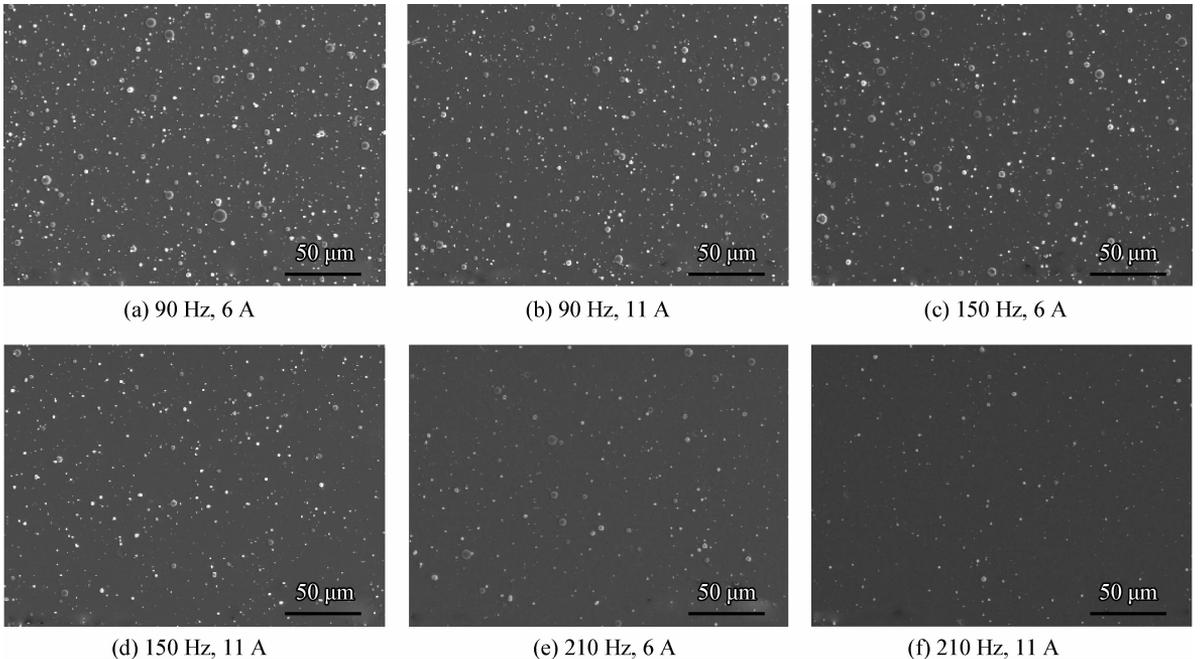


图24 不同频率和强度的旋转横向磁场条件下薄膜的表面形貌

Fig. 24 Surface morphologies of the films under different frequencies and intensities of the rotating transverse magnetic fields

下薄膜的表面形貌。可以看出大颗粒的分布和弧斑的运动状态关系密切,不论是相同磁场强度随着旋转频率的提高还是相同频率随着磁场强度的提高,随着瞬态弧斑线在靶面分布面积的增加,薄膜表面的大颗粒都大幅度减少,其中频率的影响因素更大一些,因为频率对弧斑状态的改变影响更明显。

随着弧斑从 I 态转变为 II 态然后变化为 III 态,弧斑分裂,弧斑的运动速度和范围大幅度增加,电流密度不断下降,因此弧斑下液态熔池的面积也不断的减小,使得大颗粒的喷射强度减弱,大颗粒的数目和尺寸大大减小。当弧斑呈现出完全分布于整个靶面的 III 态时(210 Hz, 11 A),薄膜表面颗粒数目的面积只占薄膜总面积的 0.61%,由于放电均匀分布在靶面,电流密度不集中,靶面加热均匀,几乎很难有较大的液态熔池出现,靶面呈比较均匀的蒸发,因此几乎没有大颗粒的发射。由于不同的弧斑运动状态对应不同程度的颗粒分布,因此完全可以实现颗粒的可控沉积。

3 结 论

针对磁控溅射和阴极弧离子镀沉积技术存在的局限性,以常规圆形平面磁控靶为典型例子,采用有限元磁场模拟计算分析了磁控靶结构参数的影响,针对外加电磁线圈磁控溅射系统,分析了电磁线圈位置和激励模式对磁控辉光等离子体特性和靶材利用率的影响,发现外加电磁线圈可以在较大范围内控制基片等离子体参数。

在电弧系统中设计和制作了轴对称磁场和旋转磁场,并研究了它们对阴极弧离子镀弧斑运动形貌和薄膜表面大颗粒等特性的影响。发现随着轴对称磁场横向分量强度的增加,薄膜表面的大颗粒的数目和尺寸大为减少。在磁场强度较低时,沉积到薄膜表面的颗粒大部分是比较大的熔融态颗粒;而随着磁场强度的提高,大尺寸颗粒减少,在磁场强度较高时,沉积到薄膜表面的颗粒大部分是小的固态颗粒;在低频旋转横向磁场条件下,随着横向磁场强度的增加,弧斑形貌由聚集的明亮大斑点逐渐转变为较为平直的长细线。在旋转横向磁场强度和频率的综合作用下,随着旋转横向磁场强度和频率的提高,弧斑逐渐从聚集的斑点态转变为大面积分布在靶

面的较强分散弧斑絮线,最后变化为完全分布在靶面的强分散弧斑线,弧斑分裂强烈,弧斑运动范围分布在靶面,薄膜表面的大颗粒大幅度减少,靶材利用率高。

目前,这种旋转磁场控制弧斑的方法,虽然在消除大颗粒方面获得了很大的改善,但百分之百完全消除大颗粒还有技术瓶颈,特别是对于高熔点靶材存在一定的难度,有待于对磁场位形及其均匀性做更为深入的模拟和试验,未来的发展方向是实现靶材表面全均匀的扩散弧,达到大颗粒完全消除的最终目标。

参考文献

- [1] Ivanov I, Kazansky P, Hultman L, et al. Influence of an external axial magnetic field on the plasma characteristics and deposition conditions during direct current planar magnetron sputtering [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1994, 12(2): 314-320.
- [2] Engstrom C, Berlind T, Birch J, et al. Design, plasma studies, and ion assisted thin film growth in an unbalanced dual target magnetron sputtering system with a solenoid coil [J]. *Vacuum*, 2000, 56(2): 107-113.
- [3] Vyskocil J, Musil J. Arc evaporation of hard coatings: process and film properties [J]. *Surface & Coatings Technology*, 1990, 43-44: 299-311.
- [4] Boxman R L, Goldsmith S. Macroparticle contamination in cathodic arc coatings: generation, transport and control [J]. *Surface & Coatings Technology*, 1992, 52(1): 39-50.
- [5] Takikawa H, Tanoue H. Review of cathodic arc deposition for preparing droplet-free thin films [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2007, 35(4): 992-997.
- [6] Anders S, Anders A, Brown I G. Macroparticle-free thin films produced by an efficient vacuum arc deposition technique [J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 74: 4239-41.
- [7] Martin P J, Bendavid A. The filtered arc process and materials deposition [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2001, 142: 7-10.
- [8] Aksenov I I, Belous V A, Padalka V G, et al. Transport of plasma streams in a curvilinear plasma-optics system [J]. *Journal of Plasma Physics*, 1978, 4: 425-428.
- [9] Ramalingam S, Qi C B, Kim K. Controlled vacuum arc material deposition, method and apparatus [P]. US: 4673477. 1986-02-04.
- [10] 闻立时, 郎文昌, 肖金泉, 等. 旋转磁控电弧离子镀弧源 [P]. 中国: CN101363115. 2009-02-11.
Wen L S, Lang W C, Xiao J Q, et al. Rotating magnetic field controlled arc source for arc ion plating [P]. China:

- CN101363115. 2009-02-11 (in Chinese)
- [11] 张小波. 反应磁控溅射掺杂 ZnO 透明导电氧化物薄膜的研究 [D]. 沈阳:中国科学院金属研究所, 2007.
Zhang X B. Investigation on doped-zinc oxide transparent conducting oxide thin film prepared by reactive magnetron sputtering, [D]. Shenyang: Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 2007 (in Chinese).
- [12] Svadkovski I V. Characterisation parameters for unbalanced magnetron sputtering systems [J]. *Vacuum*, 2003, 68(4): 283-290.
- [13] Zhang X B, Xiao J Q, Pei Z L, et al. Influence of external solenoid coil arrangement and excitation mode on plasma characteristics and target utilization in a DC-magnetron sputtering system [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2007, 25(2): 209-214.
- [14] Ido S, Ishida Y, Hijikata K. Measurements of plasma controlled by compressed magnetic field magnetron sputtering technique [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1993, 32: 2112-5.
- [15] Ido S, Kashiwagi M, Takahashi M. Computational studies of plasma generation and control in a magnetron sputtering system [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1999, 38: 4450-4.
- [16] 郎文昌. 电磁场控制的电弧离子镀弧源设计及沉积工艺的研究 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2010.
Lang W C. Design and investigation of electromagnetic field steered arc sources and magnetic field enhanced deposition process of arc ion plating [D]. Shenyang: Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 2010 (in Chinese).
- [17] Boxman R L, Martin P J, Sanders D M. *Handbook of vacuum arc science and technology* [M]. New Jersey: Noyes Publications, 1995: 3.
- [18] Anders A. *Cathodic arcs; from fractal spots to energetic condensation* [M]. 3rd edition. Berkeley: Springer, 2008: 75.
- [19] Beilis I I. Vacuum arc cathode spot grouping and motion in magnetic fields [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(6): 2124-32.
- [20] Harris L P. Transverse forces and motions at cathode spots in vacuum arcs [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1983, 11(3): 94-102.
- [21] Fang D Y. Cathode spot velocity of vacuum arcs [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1982, 15: 833-844.
- [22] John R M, Winans J G. Motion of arc cathode spot in a magnetic field [J]. *Physical Review*, 1954, 94: 1097-103.
- [23] 郎文昌, 肖金泉, 宫骏, 等. 轴对称磁场对电弧离子镀弧斑运动的影响 [J]. *金属学报*, 2010, 46(3): 372-379.
Lang W C, Xiao J Q, Gong J, et al. Influence of axisymmetric magnetic field on cathode spots movement in arc ion plating [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(3): 372-379 (in Chinese).
- [24] Xiao J Q, Lang W C, Gong J, et al. Effects of axisymmetric magnetic field on the distribution of macro-particles on TiN and (Ti, Al)N films by arc ion plating [J]. *Physics Procedia*, 2011, 18: 193-201.
- [25] 肖金泉, 郎文昌, 赵彦辉, 等. 轴对称磁场对电弧离子镀 TiN 薄膜结构及摩擦性能的影响 [J]. *金属学报*, 2011, 47(5): 566-572.
Xiao J Q, Lang W C, Zhao Y H, et al. Influence of axisymmetric magnetic field on microstructure and friction performance of TiN film deposited by arc ion plating [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011, 47(5): 566-572 (in Chinese).
- [26] Lang W C. Design and performance of the transverse rotating magnetic field steered arc source used in vacuum arc deposition [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 337: 70-76.
- [27] 陈树君, 王学震, 华爱兵, 等. 磁控电弧旋转磁场发生装置的设计 [J]. *电焊机*, 2006, 36(5): 47-50.
Cheng S J, Wang X Z, Hua A B, et al. Rotating magnetic field generator used to control welding arc [J]. *Electric Welding Machine*, 2006, 36(5): 47-50 (in Chinese).

(责任编辑: 黄艳斐)