

弧光放电氩离子清洗源

王福贞¹, 陈大民², 颜远全³

(1.北京联合大学,北京 100102;2.大连纳晶科技公司,辽宁 大连 116600;3.深圳嘉德真空光电有限公司,深圳 518110)

摘 要:弧光放电氩离子清洗源是提高膜基结合力的新技术。由空心阴极枪、热丝弧枪、阴极电弧源发射的高密度弧光电子流把氩气电离,用得到的高密度的氩离子流清洗工件。工件偏压 200V 以下,工件偏流可以达到 10A-30A,弧光放电氩离子流密度大,对工件的清洗效果好。本文介绍了几种配置弧光放电氩离子清洗源的电弧离子镀膜机和磁控溅射镀膜机。

关 键 词:固体弧光放电氩离子清洗源;气体弧光放电氩离子清洗源;结合力;旋靶管型柱状非平衡闭合磁场的磁控溅射镀膜机

中图分类号:TB43 文献标识码:A 文章编号:1002-0322(2019)01-0027-07

doi: 10.13385/j.cnki.vacuum.2019.01.06

The cleaning sources with argon ions using vacuum arc discharge technology

WANG Fu-zhen¹, CHEN Da-min², YAN Yuan-quan³

(1.Beijing Union University, Beijing 100102, China; 2.Dalian Nano-crystal Tech. Co., Ltd. Dalian 116600, China; 3.Shenzhen Golden Vacuum Photoelectrics Co., Ltd. Shenzhen 518110, China)

Abstract: The cleaning sources with argon ions using vacuum arc discharge technology are new methods to improve the adhesive strength between top layer and substrate, where electrons coming from arc discharge plasma by hollow cathode gun, heater filament gun and vacuum cathode arc sources produce argon ions and then the argon ions were used to clean the samples before coating process. With the help of this technology, bias currents on substrate holder can reach between 10A and 30A under the condition of bias voltages of only 200V. This new clean method has great advantage, since it brings the high ion density. The article also gives a brief introduction on the vacuum arc deposition systems and magnetron sputtering system with this advanced Ar⁺ cleaning sources.

Key words: vacuum arc discharge argon ion cleaning source; gas arc discharge argon ion cleaning source; adhesive strength; magnetron sputtering system with unbalanced closed magnetron field of cylindrical cathode

真空镀膜技术在国民经济的各个领域发挥着重要作用,几十年来各种性能优异的薄膜材料层出不穷。但是,性能再好的薄膜都必须与基体有很好的结合力。因此,多年来出现了多种提高膜基结合力的轰击清洗技术。

1 轰击清洗技术的类型

1.1 辉光放电氩离子轰击清洗

直接通氩气:辉光放电

工件偏流 0.5A-2A。

阳极层离子源:辉光放电

工件偏流 1A-4A。

图 1 为阳极层离子源,图 2 为辉光放电照

片,辉光比较暗淡。

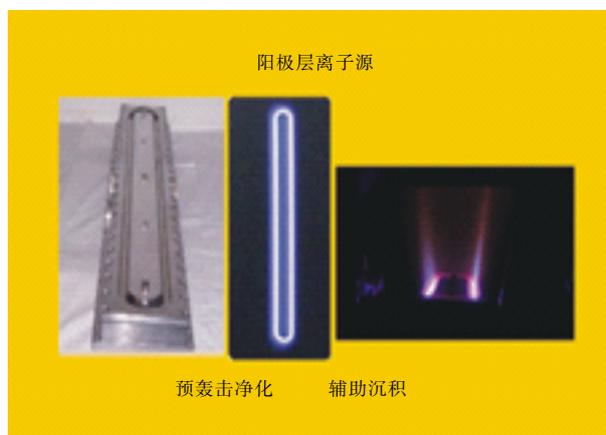


图 1 阳极层离子源

Fig.1 Anode-layer ion source

收稿日期:2018-05-10

作者简介:王福贞(1935-),女,天津市人,教授,国务院津贴专家。



图 2 辉光放电照片

Fig.2 Photo of glow discharge

1.2 弧光放电轰击清洗

气体源弧光放电：用空心阴极枪、热丝弧枪发射的弧光电子流把氩气电离，利用高密度的氩离子流清洗工件；

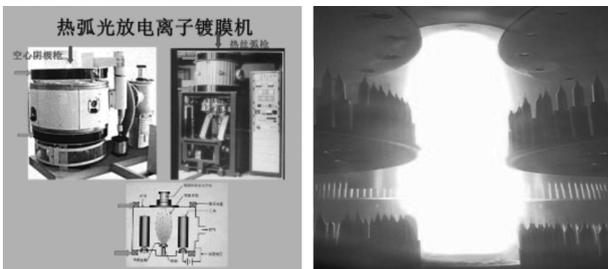
固体源弧光放电：阴极电弧源弧光放电，直接用电弧中金属离子(Ti⁺)轰击清洗工件；

固体源弧光放电：阴极电弧源发射的弧光电子流把氩气电离，用氩离子流清洗工件。

2 弧光放电氩离子轰击清洗技术的发展

2.1 气体源弧光放电氩离子清洗源

起初，空心阴极离子镀膜机和热丝弧离子镀膜机中，由空心阴极枪和热丝弧枪发射的弧光电子流作为工件的加热源、工件的轰击清洗源和镀膜源使用。图 3a 为空心阴极离子镀膜机和热丝弧离子镀膜机的外形照片。两种枪都安装在镀膜机的顶部中央，镀膜室外设上下两个电磁线圈。



a- 镀膜机外形照片；b- 氩离子清洗工件照片

图 3 气体弧光放电氩离子轰击清洗工件

Fig.3 Cleaning samples using argon ions from gas arc discharge plasma: a-photo of coating equipment; b-photo of cleaning process

现在主要用于轰击清洗工件。空心阴极枪和热丝弧枪发射的弧光电子流在向阳极运动的过程中把氩气电离，用高密度的氩离子流清洗工件。一般枪电流达 150A-200A，工件偏压 200V 以

下，偏流可以到 30A 以上，轰击清洗效果好。图 3b 为空心阴极枪和热丝弧枪发射的弧光电子流射向阳极的过程中把氩气电离，用氩离子流清洗工件的放电照片。

2.2 固体源弧光放电氩离子清洗源

起初：用阴极电弧源做清洗源的技术起源于“ABS”^[1](Arc Bond Sputtering)源。图 4 为 ABS 源的原理图。

阴极电弧离子镀的结合力好，但膜层组织中有粗大的熔滴；磁控溅射镀膜的膜层组织细密，但膜基结合力差。因此出现了“ABS”源。通过改变靶材后面外圈磁钢的前后位置，来改变靶面前的磁场强度。首先把外圈磁钢 4 向后拉，靶面磁场强度 1mT-5mT，产生弧光放电，用高偏压加速金属离子(Ti⁺)轰击清洗工件。然后把外圈磁钢 4 向前推，靶面的磁场强度 30mT-50mT，进行磁控溅射镀膜。

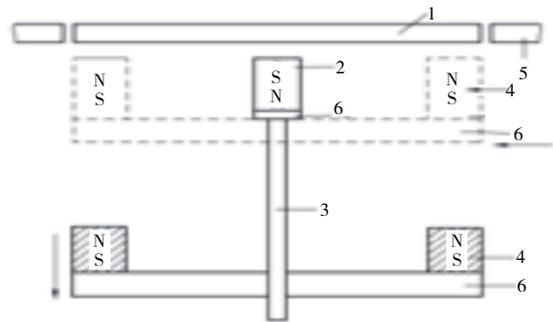


图 4 ABS 源的原理图

Fig.4 schematic of ABS source

标配：直到现在磁控溅射镀膜机中多配有小弧源。先用阴极电弧源清洗，再用磁控溅射靶镀膜，成为了磁控溅射镀膜机的标配。图 5 为配置阴极电弧源的磁控溅射镀膜机照片。a.平面靶镀膜机外形照片；b.为柱状靶镀膜机原理图。在工具镀膜机中，工件轰击偏压 800V；在装饰镀膜机中，工件轰击偏压 400V。用这么高的偏压加速金属离子，金属离子的能量太高，会使工件过热、表面产生损伤或有太熔滴的积存。所以用阴极电弧源清洗工件时，需逐个启动小弧源，每个弧源的放电时间只有 1-2 分钟。从上到下地启动小弧

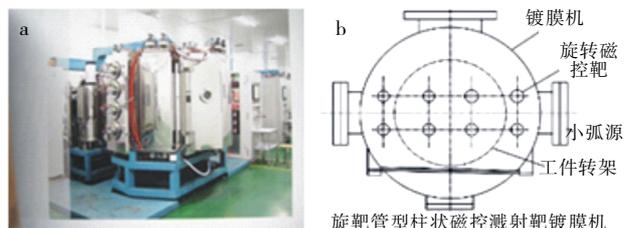


图 5 配置阴极电弧源的磁控溅射镀膜机照片

Fig.5 Sputtering equipment with vacuum arc source

源,实现从上到下地把工件清洗一遍。

发展:近几年,仍然用阴极电弧源清洗工件,但清洗工件的不是金属离子,而是转化为用弧光放电氩离子流清洗工件。阴极电弧源发射的弧光等离子体中的电子流在向阳极运动的过程中把氩气电离,用高密度的氩离子流轰击清洗工件。由于氩离子流密度大,工件不需要加偏压 400V-800V,一般在 200V 以下,偏流可以到 10A-20A。氩离子质量轻,对工件的刻蚀损伤小。用低能量、高密度的氩离子流清洗工件,清洗效果好,工件的表面质量好。

3 弧光放电氩离子清洗源应用举例

3.1 热丝弧枪是 Balzers 公司的原创

现在 Balzers 公司已经不用热丝弧枪作为镀膜源了,但几十年来仍然把热丝弧枪安装在新型镀膜机产品中。图 6 为 Balzers 公司新型镀膜机的照片。a.为安装永磁体加电磁控小弧源的工具镀膜机照片;b.为磁控溅射镀膜机照片。在镀膜机的顶部仍然安装热丝弧枪。镀膜室周边上下安装电磁线圈。



a- 工具镀膜机;b- 磁控溅射镀膜机
图 6 安装热丝弧枪镀膜机照片

Fig.6 Picture of coating equipment with heat filaments arc gun:
a-equipment for coating tool b-magnetron sputtering equipment

3.2 大连纳晶科技公司在工具镀膜机中配置空心阴极枪

在安装永磁体加电磁线圈的小弧源工具镀膜机中,配置了金属枪体的空心阴极枪。在镀膜机顶部中央安装两把空心阴极枪,其中一把枪备用,保证生产的连续稳定进行。用钽管和六硼化镧复合结构发射电子流。图 7 为大连纳晶科技公司的工具镀膜机的外形照片。偏压 200V 以下,偏流大于 30A。

3.3 Hauzer 公司在平面靶磁控溅射镀膜机和电弧离子镀膜机中配置了热丝弧枪

Hauzer 公司多年生产平面非平衡闭合磁场的磁控溅射镀膜机,近期在镀膜室顶部的侧边安装热丝弧枪,镀膜室底部安装水冷阳极,用热丝

弧枪得到的高密度的氩离子流清洗工件。图 8 为 Hauzer 公司设备原理图。

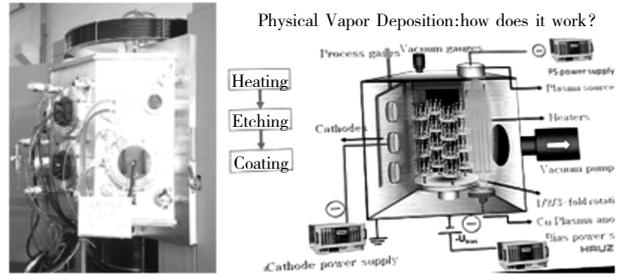
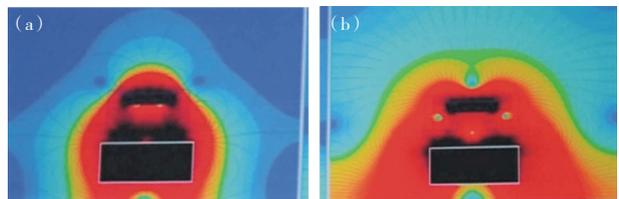


图 7 安装空心阴极枪的工具镀膜机照片
图 8 侧边安装热丝弧枪镀膜机结构示意图

Fig.7 Picture of equipment for installing hollow cathode gun
Fig.8 Diagram of equipment for installed heater filament arc cathode gun on the side of chamber

平面磁控溅射靶的磁控结构有平衡磁控结构和非平衡磁控结构。平衡磁控溅射靶内的 N、S、N 极全部采用强磁钢钕铁硼,把磁场紧紧地约束在靶面前;非平衡磁控溅射靶内的磁控结构由强磁钢和弱磁体组成,靶面前的磁场向工件方向推移、向靶的周边方向扩展。平面靶内平衡磁控和非平衡磁控磁场分布如图 9 所示。a.为平衡磁控,b.为非平衡磁控。



a- 平衡磁控;b- 非平衡磁控

图 9 平衡和非平衡磁控溅射靶磁场分布图
a-Balanced magnetron; b.Unbalanced magnetron

Fig.9 Magnetic field distribution of balanced-unbalanced magnetron targets

将相邻两个平面非平衡磁控溅射靶的磁极性反向排列,形成闭合磁场,图 10 为 Teer 公司的非平衡磁控溅射靶闭合磁场分布的计算机模拟图。相邻两个靶之间有磁力线交联,镀膜室内各个部位的电子都会受电磁场的作用,做旋轮线运动,提高碰撞几率和等离子体密度。图 11 为 Hauzer 公司平面非平衡闭合磁控溅射镀膜机结构示意图。Hauzer 公司在镀膜室侧边的顶上安装热丝弧枪,先利用弧光氩离子清洗工件,然后用非平衡闭合磁场的磁控溅射靶进行镀膜。

Hauzer 公司利用磁控溅射镀膜温度低的优点,先用平面非平衡闭合磁控溅射靶镀一层 CrN、WC,再用 PECVD 等方法镀 DLC,Teer 公司用石墨靶镀 GLC,得到摩擦系数很低的耐磨涂

层。用于提高汽车等低温回火的耐磨零件、渗碳淬火零件和低温回火工模具的耐磨性。这一技术扩展了真空镀膜技术的向低温回火零件应用的范围。图 12 为耐磨零件照片。

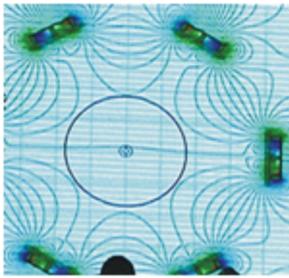


图 10 闭合磁场分布图
Fig.10 Closed magnetron field by modeling

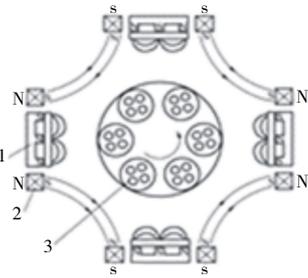


图 11 平面非平衡闭合磁场溅射原理图
Fig.11 Diagram of planes unbalanced closed magnetron field

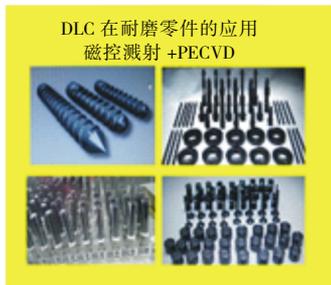


图 12 耐磨零件图
Fig.12 Tough worktable

3.4 Platit 公司提供了一种新的固体弧光放电氩离子清洗技术

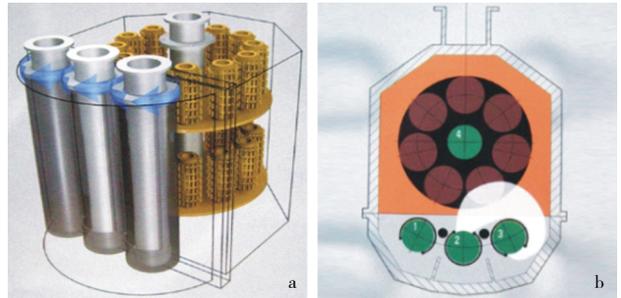
在旋靶管型柱状阴极电弧源离子镀膜机门上安装柱弧源,把两个柱弧源中的一个接弧电源的正极,另一个仍然接负极。这两个柱状源互为阴阳极,接通弧电源以后,两个柱状源之间产生弧光放电,高密度的弧光电子流在向阳极柱弧源运动的过程中把氩气电离,用高密度的氩离子流轰击清洗工件。由于氩离子密度大,工件不需要加400V-800V 偏压,一般在 200V 以下,偏流可以到 10A-20A。氩离子质量轻,对工件的刻蚀损伤小,工件表面的亮度优于用钛离子清洗的工件。

图 13 为 Platit 公司设备的原理图和工作照片。a.为镀膜室内的配置图;b.两个柱弧源互为阴阳极;c.两个柱弧源清洗时的放电照片;d.柱弧源镀膜过程的放电照片。

3.5 Balzers 用小弧源和水冷阳极间发射的电子流把氩气电离,用氩离子清洗工件

在安装永磁体加电磁线圈的小弧源工具镀膜机中的镀膜室门上安装小弧源,小弧源前面安装水冷阳极。接通弧电源以后,小弧源和水冷阳

极之间产生弧光放电,弧光电子流绕到面向工件一方的阴极板上,在此过把周围的氩气电离,用高密度的氩离子轰击清洗工件,简称 IET 技术,图 14 为采用 IET 技术的镀膜机。图 17 为 IET 镀膜机的照片。a.为阳极位置照片,b.为清洗时的放电照片。工件偏压 200V,工件偏流大于 18A。门上的小弧源只作为清洗源使用,镀膜时闲置不用。



a- 镀膜室内的配置;b- 两个柱状源互为阴阳极;
c- 两个柱弧源清洗照片;d- 镀膜过程照片

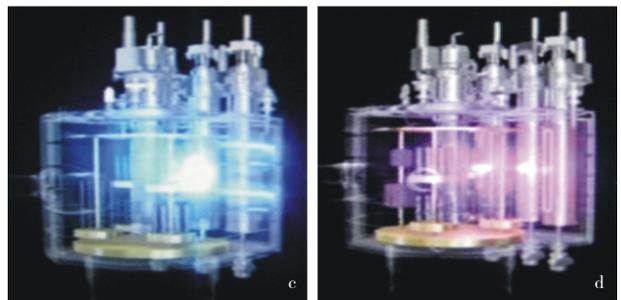


图 13 Platit 公司设备的原理图和放电照片
Fig.13 Schematic and discharge photos of Platit's equipment

a-Configuration of coating chamber;
b-Two cylindrical sources are anode and cathode each other;
c- Clean picture of two cylindrical arc sources;
d-Coating picture



a- 小弧源前面设水冷阳极;b- 氩离子清洗照片

图 14 门上安装小弧源,前面设水冷阳极板的照片

Fig.14 Equipment used Ar⁺ cleaning sources by vacuum cathode arc method: a-picture of anode on the door b-picture of Ar⁺ cleaning process

3.6 上海都浩公司在矩形平面大弧源镀膜机的门上安装了和壁上的大弧源呈 90 度角的水冷阳极。工件偏压 < 200V, 偏流大于 10A。

3.7 直接利用镀膜室周边的阴极电弧镀膜源做阴极,镀膜室中部设置水冷阳极

王福贞在实用新型专利中提出了一种配置

固体弧光放电氩离子清洗源的镀膜机。清洗时,镀膜室周边的作为镀膜用的小弧源、矩形平面大弧源、旋靶管型柱状阴极电弧源接弧电源的负极,镀膜室中另设水冷阳极。接通弧电源以后,镀膜室周边的阴极电弧源和镀膜室中部的水冷阳极之间产生弧光放电。弧光电子流穿过工件向阳极运动的过程中把工件周围的氩气电离,及时有效地利用刚刚获得的高密度的氩离子流轰击清洗工件。这种把阳极配置在镀膜室的中间,与把弧光放电氩离子清洗源的阴阳极安装在工件转架同侧相比,其优点是镀膜室内的等离子体密度均匀分布,对工件的清洗效果等效,清洗效率高。

清洗工件以后,把弧电源的正极改接镀膜室,仍然用周边的阴极电弧源进行常规镀膜。这种方案只需要在阴极电弧离子镀膜机的镀膜室中部安装水冷阳极,就可以把原来用金属离子轰击清洗工件的过程,转化为用弧光放电氩离子流轰击清洗工件的过程。由于氩离子流偏流大,清洗时工件偏压低于 200V,轰击效果好。镀膜室壁上的阴极电弧源既是清洗源,又是镀膜源,始终在工作,没有闲置问题。图 15 为直接用阴极电弧源做阴极,镀膜室中部设置水冷阳极的镀膜机原理图^[6]。

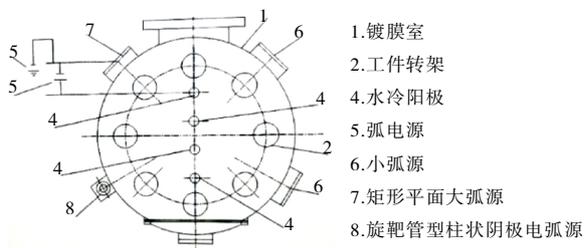


图 15 直接用阴极电弧源做阴极,中部设置水冷阳极的镀膜机原理图

Fig.15 Principle diagram of coating machine with cathode arc sources and the anode in the middle

3.8 在磁控溅射靶镀膜机中,设置固体弧光氩离子清洗源

磁控溅射技术所镀的膜层结合力小,金属离子化率低,不容易获得化合物膜层,在磁控溅射镀膜镀膜机中配置固体弧光放电氩离子清洗源可以有利于提高膜基结合力。可以在平面磁控溅射镀膜镀膜机、柱状磁控溅射镀膜镀膜机中设置柱弧源,利用柱弧源发射的电子流把氩气电离用高密度的氩离子流清洗工件。

当今,“旋靶管型柱状磁控溅射靶”作为平面磁控溅射靶使用已经很广泛了,和“平面磁控溅射靶”相比,旋靶管型柱状磁控溅射靶结构简单、

安装方便、靶材利用率高、靶中毒轻。我国许多公司使用了柱状磁控溅射靶配置中频电源的镀膜机。图 16 为旋靶管型柱状磁控溅射靶的放电照片。但多采用平衡磁控结构,磁力线仅仅地被约束在靶面附近,也没有采用非平衡闭合磁场。王福贞和深圳嘉德真空光电有限公司采用强磁钢和弱磁体组成的非平衡磁控结构,磁场分布是弱 S- 强 N- 弱 S(一条强磁钢),也可以是强 N- 弱 S- 强 N(两条强磁钢)。磁力线可以向靶的前方推移,向靶的周边扩展。图 17 为不同磁控结构的旋靶管型柱状磁控溅射靶的放电照片。两种非平衡柱状磁控溅射靶都已经在生产中使用。

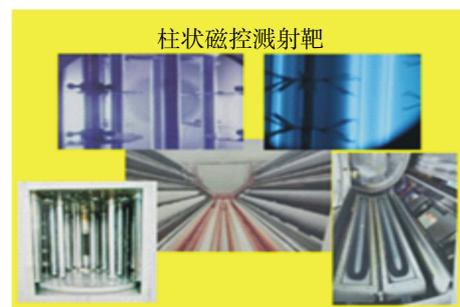


图 16 旋靶管型柱状磁控溅射靶镀膜机

Fig.16 Magnetron sputtering system with rotational cylindrical cathode

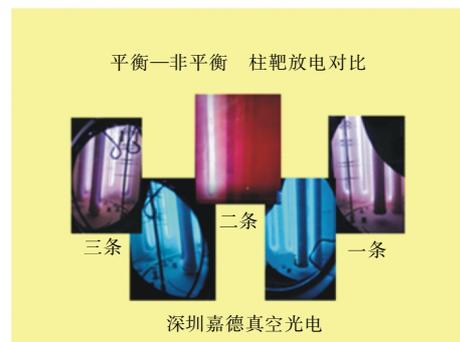


图 17 旋靶管型柱状磁控溅射靶放电照片

Fig.17 Photo of discharge for rotary cylindrical target of magnetron sputtering

王福贞申请了旋靶管型柱状非平衡闭合磁场的磁控溅射镀膜机专利。由于非平衡柱状磁控溅射靶靶前面的磁场向工件方向推移,向靶的周边扩展,把相邻两个旋靶管型非平衡磁控溅射靶的磁极性反向排列,可以形成闭合磁场。在工件转架的外侧安装单层旋靶管型非平衡磁控溅射靶,也可以在工件转架的两侧都安装旋靶管型柱状非平衡磁控溅射靶,前者只形成外周圈的闭合磁场。后者既形成外层周向闭合磁场、内层周向闭合磁场,还形成内外两层旋靶管型柱状非平衡磁控溅射靶之间的径向磁场。也就是在镀膜室内形成多方位闭合磁场,控制更多的电子做旋轮线

运动,可以和更多的氩气、更多的金属膜层原子产生碰撞电离。镀膜室内的等离子体密度显著提高。图 18 为王福贞实用新型专利^[2],安装两层旋靶管型柱状非平衡磁控溅射靶镀膜机原理图。a. 为安装一条强磁钢的旋靶管型柱状非平衡磁控溅射靶的结构原理图, b. 为安装两层旋靶管型柱状非平衡磁控溅射靶镀膜机原理图。这仍然是磁控溅射镀膜机,为了提高膜基结合力,王福贞把前面介绍的固体弧光放电氩离子清洗源配置在磁控溅射镀膜机中,申请了几种配置弧光放电氩离子清洗源的镀膜机专利。

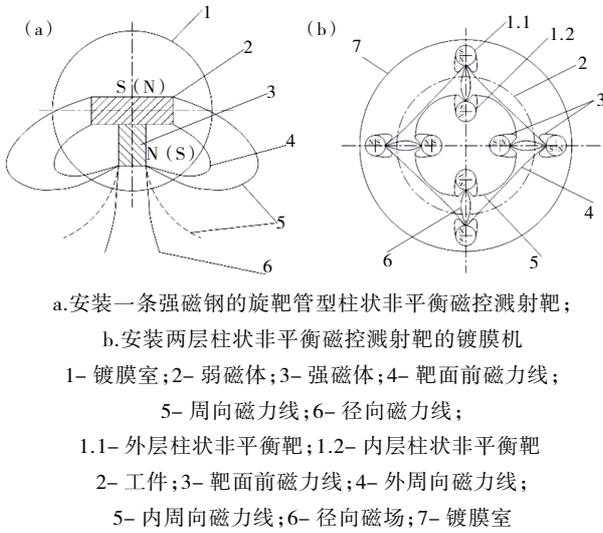


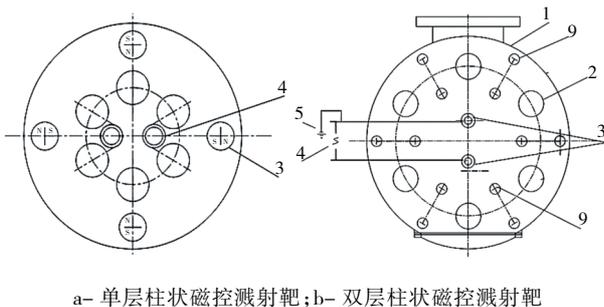
图 18 安装两层旋靶管型柱状非平衡磁控溅射靶镀膜机

Fig.18 Sputtering equipment installing two-layer cylindrical unbalanced magnetron target

a. The rotary cylindrical unbalanced magnetron sputtering target installing one strong magnet; b. Sputtering equipment installing two-layer cylindrical unbalanced magnetron target

在磁控溅射镀膜机中配置柱弧源作为固体弧光放电氩离子清洗源的具体配置方案有两种:

一种是: 在镀膜室中部设置两个柱状阴极电弧源。两个柱状阴极电弧源互为阴阳极(图 a 中的 4, 图 b 中的 3)。其结构示意图如图 19 所示^{[3][5]}。



a- 单层柱状磁控溅射靶; b- 双层柱状磁控溅射靶

图 19 两个柱弧源互为阴阳极

Fig.19 Using two cylindrical sources as cathode and anode, separately: a-single circle of sputtering sources; b-double circles of sputtering sources

一种是: 镀膜室的中央安装柱状阴极电弧源 3, 镀膜室的周边设置水冷阳极 4。即固体弧光放电氩离子清洗源的阴极和阳极设置在工件转架的两侧, 其原理图如图 20 所示^[6]。

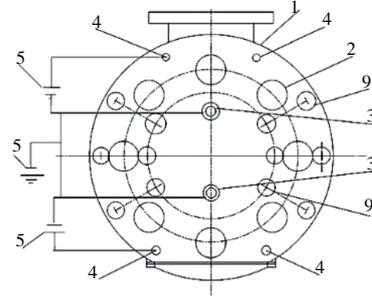


图 20 阴阳极设在工件两侧

Fig.20 Cathode and anode ambo-workpiece

镀膜室内设置固体弧光放电氩离子清洗源的技术,是把弧光放电等离子体引进磁控溅射镀膜技术中,除了提高膜基结合力,还可以参与镀膜。在清洗工件以后,镀膜室中部的柱状阴极电弧源可以和周边的镀膜源一起镀纳米多层膜,柱状阴极电弧源所镀的膜层很细,可以作为纳米多层膜中的一个间隔层。而且在参与镀膜时,高密度的弧光等离子体中的高密度的电子流还可以把溅射下来的膜层原子电离,提高金属离子化率。所以固体弧光放电氩离子清洗源是清洗源、镀膜源和离子化源,对提高磁控溅射的镀膜质量起非常重要的作用。

3.9 磁控溅射镀膜机顶部中央安装空心阴极枪为弧光放电氩离子清洗源的镀膜机

在安装单层或两层旋靶管型柱状非平衡磁控溅射靶镀膜机中,以及平面磁控溅射靶镀膜机中,在镀膜室的顶部中央安装空心阴极枪。图 21 为安装空心阴极枪作为气体弧光放电氩离子清洗源的磁控溅射镀膜机原理图^[4]。

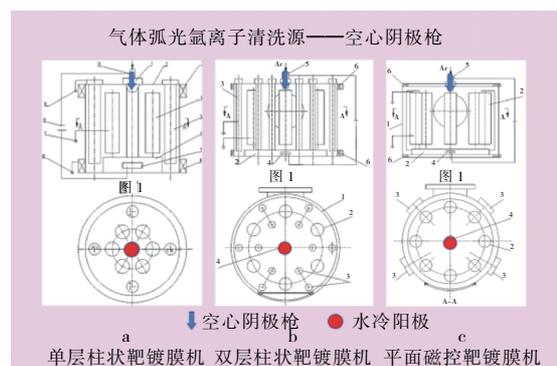


图 21 配置空心阴极枪为弧光放电氩离子清洗源的镀膜机

Fig.21 Coating equipment with hollow cathode gun as arc discharge argon ion cleaning source

空心阴极枪是自持弧光放电发射高密度的弧光电子流,而热丝弧枪是旁热式的枪,需要较高的加热电源才能把灯丝加热到 2300℃ 发射热电子。空心阴极枪安装在镀膜室的顶部中央,不占用镀膜空间。镀膜室周边安装上下的电磁线圈可以控制弧光电子流做旋转运动,对弧光等离子体产生搅拌作用,增加弧光电子流和气体、和膜层原子的碰撞几率。

4 结论

本文介绍了在阴极电弧源离子镀膜机,平面非平衡磁控溅射镀膜机、旋靶管型柱状非平衡磁控溅射镀膜机中,安装的空心阴极枪、热丝弧枪和阴极电弧源产生弧光放电时,发射高密度弧光等离子体中的电子流在向阳极的过程中把氩气电离,用高密度的氩离子流清洗工件。工件偏压 200V 以下,偏流大于 10A。是当前最具优点的轰击清洗源。而且既是清洗源还是镀膜源、离化源。我们应该更好地利用弧光电子流为镀膜的全过

程服务。

本人在 2014 年初,在网易云课堂免费播放的《离子镀膜技术》视频教程的第 8 节中,曾建议大家重视“弧光电子流在镀膜全过程中的应用”,今天仍然呼吁镀膜界的同行们,充分利用弧光电子流为我们镀膜的全过程服务。

参考文献

- [1] 王福贞,马文存.气相沉积应用技术[M].北京:机械工业出版社,2007:163-164
- [2] 王福贞.一种磁控溅射镀膜机[P].中国专利:201720302687.3.2017,03.27.
- [3] 王福贞.一种磁控溅射镀膜机[P].中国专利:201720302520.7.2017,03.27.
- [4] 王福贞.一种配置气体弧光等离子体清洗源的镀膜机[P].中国专利:201720274436.4,2018.02.07.
- [5] 王福贞.一种配置固体弧光等离子体清洗源的镀膜机[P].中国专利:201720436427.5,2018.04.08.
- [6] 王福贞.一种配置固体弧光等离子体清洗源的镀膜机[P].中国专利:201721044882.7,2017.08.21.



《离子镀膜技术》视频片已经在“网易云课堂”播放

真空界著名专家王福贞教授编制的《离子镀膜技术》视频片已经在“网易云课堂”播放。

离子镀膜技术是制备高新技术产品的关键技术。离子镀膜技术方面的知识是与国家发展、人民生活关系更为密切的知识。目前,在课堂上,学生学习这项技术的相关知识较少,而且离子镀膜技术是在多种气体放电中进行的,学生只看书或听教师口述,对相关内容的理解比较困难,所以在《离子镀膜技术》中增加了动画片、放电的视频片和各种镀膜生产过程的视频片等动态画面,以提高学习效果。

《离子镀膜技术》视频片介绍了这一技术的相关基础知识及各种离子镀膜技术的放电原理、放电过程、应用范围。为广大青年提供科普性入门知识。使大家了解离子镀膜技术及它在国家发展中的重要意义。使更多的青年人了解离子镀膜技术、热爱离子镀膜技术。有更多的青年人成为利用离子镀膜技术生产高新技术产品和高端加工产业的生力军。在我们国家的发展进程中做出贡献。

《离子镀膜技术》可以在 < 网易云课堂 > 搜索到。

(真空杂志社 报导)