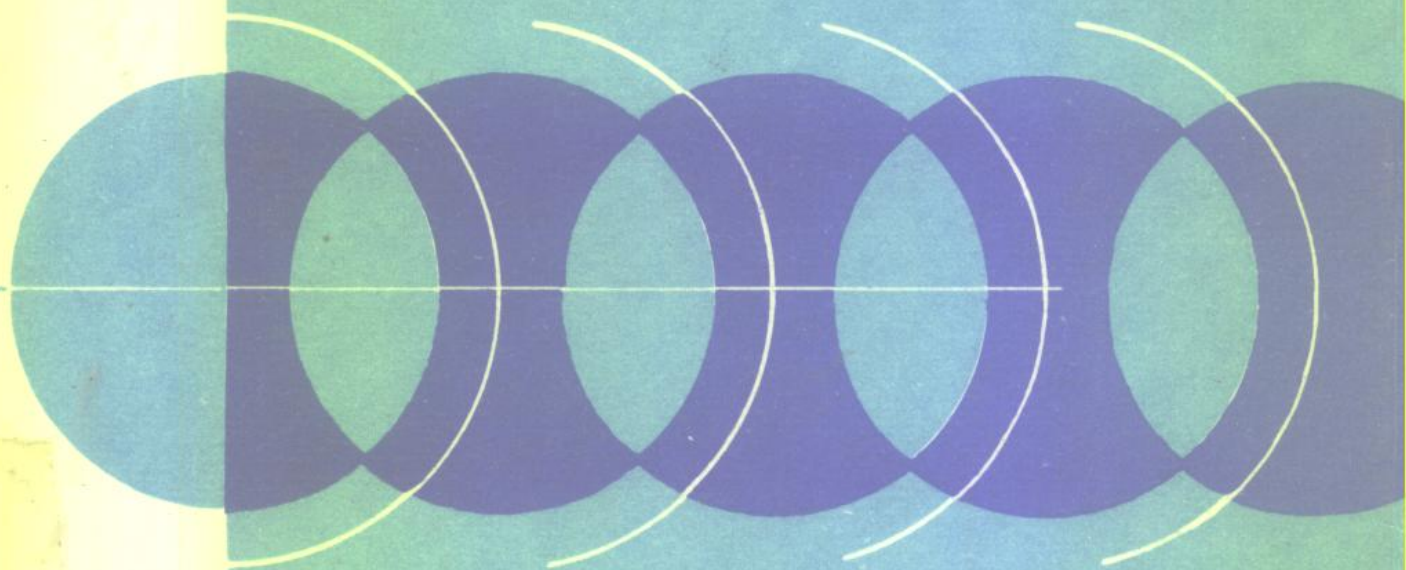


等离子体表面工程

DENG LI ZI TI BIAO MIAN GONG CHENG



中国科学技术出版社

等 离 子 体 表 面 工 程

杨 烈 宇 主编

中国 科 学 技 术 出 版 社

内 容 提 要

等离子表面技术是近年来迅速发展起来的高技术领域,它的研究成果已被广泛应用于交通、宇航、能源、机电、化工、仪表以及微电子等各部门的机具零部件上。本书编译组从1988年第一届国际等离子表面工程会议发表的国际知名学者的156篇论文中,编译了45篇国外论文,重点为等离子技术在材料表面强化与保护上应用方面的新技术、新工艺与检测方法。本译文集能使读者对国外等离子表面工程的最新发展有个基本了解,并试图对我国等离子表面技术的发展起到一定的推动作用。

©1989 by DGM Informationsgesellschaft mbH
Adenauerallee 21, D-6910 Oberursel 1
Alle Rechte vorbehalten
Printed in Germany

等 离 子 体 表 面 工 程

[德]E·布罗奇特等编

等离子体表面工程译丛编译委员会编译

杨烈宇 主编

中国科学技术出版社出版(北京海淀区白石桥路32号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

辽宁师范大学计算机科学系激光照排

大连铁道学院印刷厂印刷

开本:787×1092毫米 1/16 印张:17.375 字数:420千字

1991年7月第一版 1991年7月第一次印刷

印数:1-1,100 定价:15.00元

ISBN 7-5046-0287-6/TG·2

《等离子体表面工程》译丛编译委员会

主任委员:杨烈宇

委 员:(按姓氏笔画为序)

王富山 冯广勤 关德林 李国卿

顾卓明 倪 暹 鲁济顺 黑祖昆

本集主编:杨烈宇

本集编辑:黑祖昆 顾卓明

前 言

等离子表面技术是近年发展很快而非常活跃的高技术领域,不久前还是实验室里的设备,现已进入工厂,它的研究成果已被广泛用于交通、宇航、能源、机电、化工、仪表以及微电子等各部门的机具零部件上。1988年9月在德国的 Garmisch—Partenkirchen 举办了第一届国际等离子表面工程会议,来自美国、苏联、英国、德国、法国、日本和中国等 20 多个国家的 200 余名专家学者出席了会议,会上宣读和展出论文共 156 篇。国际上知名学者分别对等离子表面工程各个方面的最新进展和发展方向作了综合性评述的报告。我和我院授予的工学博士顾卓明同志有幸同其他中国学者应邀参加了这次盛会,包括我们的 6 篇论文在内,中国有 20 篇论文参与了这次国际交流,颇受好评。

为了把这次会议中的国外论文精华尽早介绍给国内广大读者,我们从 156 篇论文中编选了 45 篇译成中文,重点为等离子技术在材料表面强化与保护上应用方面的新技术、新工艺与检测方法。希望这本译文集能使读者对国外等离子表面工程的最新发展有个基本了解,并试图对我国等离子表面技术的发展起到一定的推动作用。

这本译文集由本人主持提出总体方案,由黑祖昆副研究员和顾卓明副教授担任全部编辑工作,李国卿副教授参加了部分编辑工作。大连海运学院有关同志分别参加了本书各篇的译校,我本人和冯广勤教授审阅了部分译稿。

由于我们自己的研究工作只涉及等离子表面工程的几个领域,囿于所见,选编翻译的内容可能有局限性,加上翻译水平不高,错误和不当之处在所难免,竭诚欢迎读者指正!

杨烈宇

1990年5月于大连海运学院

目 录

一、综述

- 等离子体表面工程——技术动向和影响 [德国]A·Hauff(1)
无机薄膜沉积工艺中的等离子体气氛 [美国]D·M·Mattox(8)
摩擦表面离子处理改性的现状和展望 [美国]T·Spalvins(20)
等离子扩渗处理 [德国]K·-T·Rie(31)
表面与薄膜分析的最新进展 [德国]H·Oechsner(42)

二、离子沉积技术

- 空心阴极辉光放电形成 TiN 工艺中氮的反应概率 [日本]Y·Matsumura 等(53)
用计算机对等离子体聚合过程进行探针诊断研究 [捷克]S·Novák(57)
用等离子体增强 CVD 法在钢上沉积 TiN 及形状的影响 [德国]K·-T·Rie 等(62)
钢表面形成 TiC 的脉冲直流等离子 CVD 工艺 [德国]K·-T·Rie 等(68)
辉光放电形成 TiN 及其复合膜 [波兰]T·Wierchoń 等(72)
等离子体增强 PVD 镀膜技术与工业应用 [列支敦]E·Bergmann 等(77)
可控电弧技术 [德国]E·Ertürk 等(82)
塑性基体上薄膜的制作与应用 [德国]W·Müller 等(87)
软材料上涂覆氮化铬的性能与摩擦学行为 [德国]D·Dubiel 等(92)
机械零件材料上 PVD 涂层的研究 [意大利]G·Schullern 等(99)

三、离子渗扩

- 等离子体——表面相互作用下新相层生长模型 [苏联]Z·A·Iskanderova 等(104)
使用空气的等离子氮化 [德国]H·-J·Kölbel 等(108)
等离子体氮化:过程与机制 [英国]A·Leyland 等(113)
等离子体(离子)渗氮与等离子体(离子)氮碳共渗装置和应用 ... [德国]F·Hombeck 等(119)
离子氮化低合金钢的主要磨损机理 [英国]Y·Sun 等(125)
不锈钢离子氮化后的点腐蚀性能 [日本]K·Ichii 等(131)

四、喷涂

- 用低压多枪等离子喷涂工艺喷涂涡轮叶片时的沉积过程 [美国]J·R·Rairden 等(135)
涂层结构和热处理对等离子喷涂陶瓷涂层耐热冲击性能的影响
..... [日本]M·Fukumoto 等(139)
生产型计算机控制真空等离子喷涂系统的设计 [德国]H·-M·Höhle 等(144)
激光处理提高等离子喷涂层的耐腐蚀性与热均压提高
等离子喷涂层的耐磨性 [比利时]M·Hannotiau 等(156)

五、溅射

- 低温磁控溅射耐磨镀膜的新发展 [德国]O·Knotek 等(161)
加钴碳化钨硬膜的制作与优化 [葡萄牙]A·Cavaleiro 等 [法国]G·Lemperiere 等(166)
靶性质对溅射过程及磁光薄膜的影响 [德国]L·A·Berchtold 等(172)

- 磁控溅射 Ti—Zr—N 系列硬膜的结构与性质 [德国]O. Knotek 等(177)
- 涂层基本性能对射频偏压溅射 TiN 磨损行为的影响
- 磨损试验机试验与零件实际应用试验 [德国]Th. Roth 等(181)

六、表面与膜的成分、结构和性能测试

- 高织构 PVD 镀层的残余应力和 X 射线弹性常数 [法国]R. Y. Fillit 等 [美国]A. J. Perry 等(187)
- 膜厚对离子镀 TiN 及 (Ti, Al)N 膜孔隙率及表面粗糙度的影响 [德国]H. Freller 等(192)
- TiN_x 和 ZrN_x 复层结构的定量 AES 分析 [南斯拉夫]P. Panjan 等(197)
- 低温沉积 TiN_x 镀层的深度分布分析 [德国]W. Bolse 等(203)
- 用反应磁控溅射法制备的 M_{100-x}N_x 薄膜的化学与结构特征 [法国]A. Bourjot 等(208)
- TiN 镀层的 X 射线全衍射图分析 [捷克斯洛伐克]V. Valvoda 等(214)
- 钨灯丝辅助加热 RF 等离子 CVD 沉积 BN 膜的结构 [日本]Y. Ichinose 等(219)
- 氮化钛膜沉积过程中加离子轰击形成的织构和微观结构的变化 [南朝鲜]B. H. Hahn 等(223)
- 硬耐磨陶瓷涂层组织与性能间的关系 [英国]D. S. Rickerby 等(228)
- 用划痕法作抗磨损硬镀层结合力试验 [英国]S. J. Bull 等(233)

七、离子束技术和硬碳膜

- 用于减少磨损与腐蚀保护的离子束混合技术 [德国]G. K. Wolf 等(238)
- 室温下离子束增强沉积的 TiN 膜的点蚀行为 [中国]Wang Bu-Qian [美国]H. Herman 等(251)
- 离子辅助法制备非晶 i-C 膜 [德国]W. Scharff 等(257)
- 用 RF 等离子 CVD 从有机化合物合成金刚石 [日本]M. Yamamoto 等(262)
- W—C : H 非晶体膜的机械与化学特性 [荷兰]W. V. Duyn 等(269)

一、综述

等离子体表面工程——技术动向和影响

[德国] A·Hauff

这是在西德召开的首届大型的国际等离子体表面工程会议。这次会议是符合目前现代化工业技术的发展趋势。这次会议标志着当今科学研究和技术应用的紧密结合。

会议的主要论题集中在:

- (1)表面、表面改性和表面镀层的微观组织和成分的分析;
- (2)用于表面处理的等离子体和等离子束增强工艺的理论 and 实际应用;
- (3)在耐磨保护、摩擦学、腐蚀学、微电子学和数据存贮以及光学方面的应用。

这次大会的主题与在圣地亚哥的 ICMC 大会和 IPAT 大会有关。值得高兴的是本次大会的组委会成功地收到了 200 多篇论文,这足以与前两个大会相比美。尽管这次在 Garmisch-Partenkirchen 召开的会议名称与以前的有所不同,前两次传统的年会在它们的早期都是以微电子学的论题为主,这次会议在这方面也占有了适当的比例。这方面技术在欧洲的现代技术中是具有代表性的。我们还高兴地见到这个在欧洲举行的会议上有来自远东的、尤其是来自中国的代表的参加。

等离子体表面工程——这个名词本身就包含着丰富的技术内容,它意味着以等离子体作为工具并以工程技术的方法对材料表面进行特定的处理。

必须肯定,今天我们还远没有完全掌握这些工艺并且运用自如地来解决现代技术中的实际问题。我们对“等离子体”这一工具知之甚少,对等离子体的相互作用也是知之甚少,对离子束与被处理的表面的作用更是知之甚少。此外,我们对于所产生的反应产物,对于经过改性的、保护处理过的或者是优化处理过的材料的表面以及亚表面的情况目前了解得也是不够深入。

此外,复杂的问题还在于:等离子体表面工程的方法被介绍到机械和汽车工业中去的时候,它们不是全都能被接受的。尽管如此,我们还是高兴地注意到在这些工业的一些公司中已经开始在这方面开展科研工作。

热蒸镀、离子镀、溅射甚至是离子注入等工艺如果没有与微电子学相关的技术和经济上的帮助就不可能达到目前的技术水平。

在今天的汽车工业中依然在生产着六缸的汽车发动机,它们并没有安装采用 PVD 技术的能延长使用寿命的新型滚动轴承。对于高技术的需求不可能自动来到,而只有在面临用传统的表面处理工艺和材料科学的方法无法克服的技术难题时,才显出它的重要性。

此外,人们还常常将高技术的方法的价格与传统的业已在应用中的方法的价格来作比较。由于目前通常还是使用小机器生产,在许多情况下这种比较的结果往往对现代化的高技术极其不利。尽管有上述种种原因,美国的工商界还是得出结论:表面技术是将在 21 世纪占优势地位的关键技术(图 1)。

但是,由于能源短缺和随之而来的需要发展节能的表面保护新技术以及人们需要寻求满足生态保护要求的表面处理新技术,光是从人类的这些需求中已使我们看到了高技术表面处理应用新的曙光,尽管这些应用有可能还只是其中的一部分。

如果要问什么是可以通过表面工程产生出的新技术动向和影响,我们可以指出下面三个方面(图 2)。

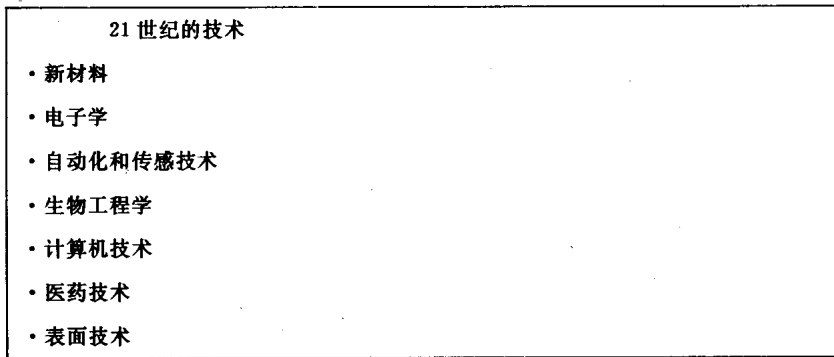


图 1 21 世纪的技术(据美国商业部的研究)

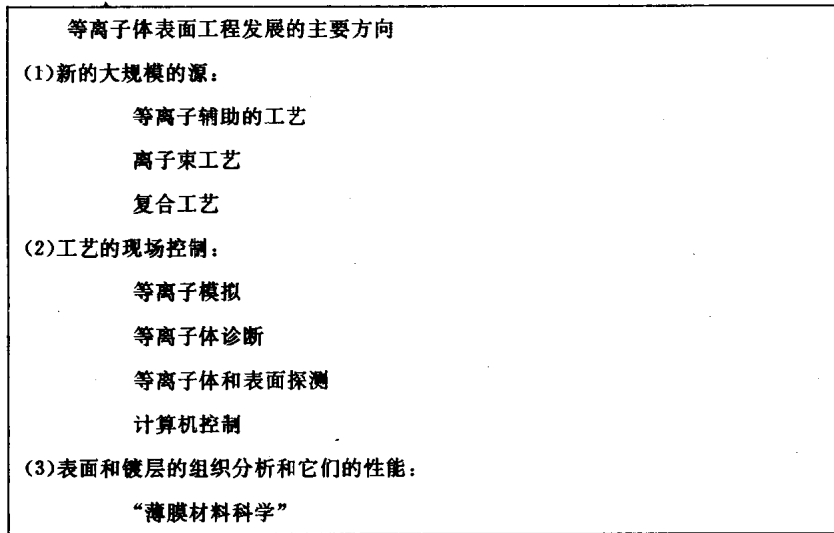


图 2 等离子体表面工程发展的主要方向

为了满足大量潜在的大规模工业应用上的要求,我们需要新的等离子体发生器和离子束源。我们需要有可以用于工厂生产的设备和工艺,但是它们必须是容易操纵和控制的、超越了实验室试验阶段的、可以实现现场工艺监控的,它们是能由工程师们掌握和管理而不再需要物理学家。

但是,我们还必须用最现代化的表面分析方法来研究有时是复杂的和尚不清楚的有关薄膜的技术上的现象。我们必须在薄膜的材料研究中做更多的工作。

有三个实例可以使情况说得更清楚。

(1)除微电子学方面的应用外,还可以举出许多大规模的应用等离子辅助的表面处理工艺。例如,采用溅射工艺在建筑用的玻璃上镀膜就是一个重要的例子。但是,对于大型的、三维的基底,尤其是对温度很敏感的塑料等材料的镀膜尚是难题。

需要有高电离度的等离子体镀膜源。这些源要能在低温和较低的气压条件下工作从而保证材料的蒸气可以扩散到空间各个地方。只有使蒸发源和等离子体源结合的镀膜装置才能满足上述要求。

来宝公司正在研制一种具有很高的电离度的磁控离子束溅射源。这个项目是和洛杉矶加利福尼亚大学一起研究的。等离子体再加上间接加热的电子发射极后能具有高的电离度。这种等离子体在具有特殊构造的离子容器中被引出来在磁场控制下加速射向带有负偏压的靶,例如:铜。这种

装置可使镀膜速度达 200nm/sec(Cu)。更重要还在于塑料片上镀的这种铜膜的性能要比大块铜好得多。

图 3 表示了薄膜电阻的倒数与铜膜厚度的函数关系。比较这些结果可知,采用磁控溅射法得到的铜膜的电阻的倒数要低得多,而采用新源沉积的铜膜有比磁控溅射法高得多的导电性。采用新源沉积的铜膜的电阻率为 $1.9\mu\Omega\text{cm}$,这很接近于纯铜的数值 $1.7\mu\Omega\text{cm}$ 。与此比较起来,磁控溅射的铜膜的电阻率为 $2.5\mu\Omega\text{cm}$,是相当高的了。

类似的差别情况还能在它们的 X-射线衍射图中观察到(图 4)。两种方法沉积的薄膜的 X-射线衍射图的对比可以发现它们的织构存在着明显的差异。织构的差异只要分别比较 X-射线峰值的相对强度比值后便能确定。这里我们只要比较 $\langle 111 \rangle$ 和 $\langle 200 \rangle$ 信号。

图 4 中表示了这些谱线的相对强度的差异。磁控溅射法得到的铜膜的 $\langle 200 \rangle$ 线的相对于 $\langle 111 \rangle$ 的强度为 26.3,明显地小于采用新离子束源沉积的铜膜的强度 43.8。此外,还表示出了纯铜的 X-射线谱线,其 $\langle 200 \rangle$ 线相对强度为 42.4。所以,我们成功地在聚酰亚胺片上沉积得具有大块材料性能的铜膜。

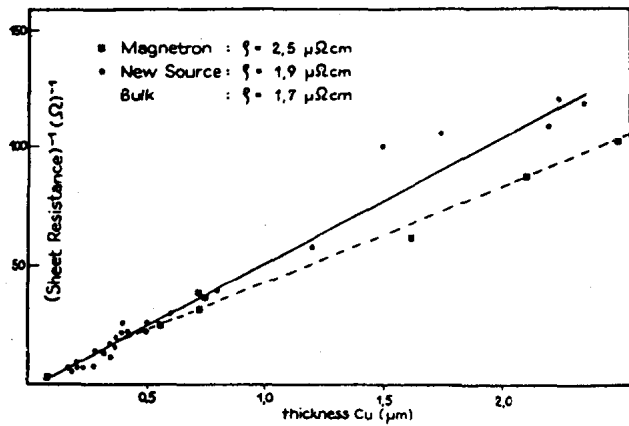


图 3 在聚酰亚胺上用不同方法沉积的 Cu 薄膜
电阻倒数与膜厚的函数关系

这个结果只是应用新的等离子体辅助的镀膜技术方面的一个例子。它表明原先是多孔的薄膜采用新的方法后性能得到改善。这为微电子工业、包装工业、电子工业和腐蚀防护等领域开辟了新的应用可能性。

(2)复杂的等离子体或离子束辅助的工艺在工业中必须靠简单的方式来操纵。物理工作者必须使他们的工艺达到能转交给生产工程师和技术人员使用的程度。这包括要确定临界的工艺参数,采用适当的探测器来确定这些参数的数量关系,将它们输入计算机中来控制工艺过程。

我们不希望大而效率不高的设备。图 5 所示的复杂的滚镀机一天二十四小时三班运转而却只有低的生产量。

工艺参数间的复杂关系如图 6 所示。它反映了在二极直流反应溅射沉积铟锡氧化物时,基本工艺参数(反应气体流量)对其它参数(放电电压、总气压和沉积速率)以及最终产物的性能(折射率、电阻率)的影响。

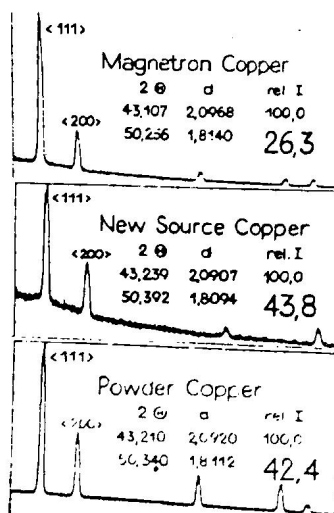


图4 各种铜材料的x-射线衍射图的比较

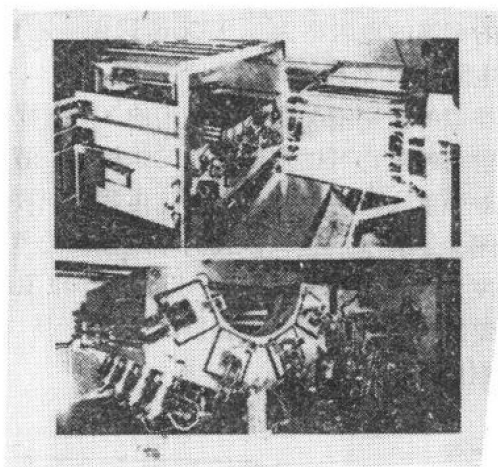


图5 用双面镀复塑料片的真空溅射镀膜装置

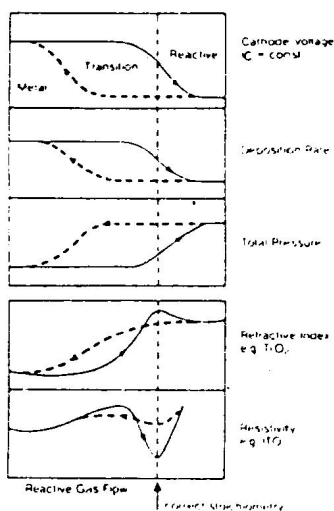


图6 反应气体流量对工艺参数和膜层性能的关系

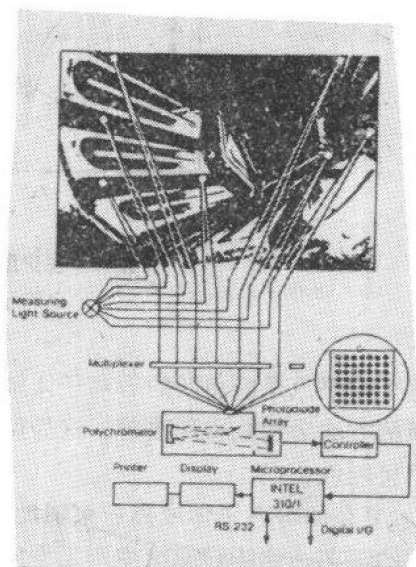


图7 塑料溅射镀膜机中的光路分光光度计的总图

在图6的上面三个图中可以看到在二极直流反应溅射中,氧气流量与三个工艺参数(放电电压、沉积速率和总气压)的相互关系。

只有确切地控制工艺条件才能保证沉积得优良的镀层和镀层性能的良好重复性。

从图6中的下面两图中又可看到,电阻率与反应气流间的狭窄界限以及折射率和反应气流间的陡斜函数关系。因此,若工艺过程控制得不合适的话,使得关键的工艺参数有太大的改变后性能

无疑也要产生很大的变化。

这是一个较为简单的工艺过程的例子。但是它已经足以说明了联机工艺控制的绝对必要性。如果考虑光学复层膜时,情况就会更复杂了。

图 7 表示了能在塑料片上沉积滤色镜的镀膜装置的横截面图。如果其中某一个阴极失去控制,那末就会在最终的复合沉积层中产生无法纠正的错误结果。这图还显示了传感器的相互关系、测量值的分析和它们向计算机中的输入。

这个图还给我们说明了现阶段工艺发展的动向:镀膜装置无须再由受过高层次教育的和领取高薪的物理学家来操纵,而是由计算机来完成工艺过程的控制。计算机是由训练有素的技术人员来管理,他们也没有必要理解工艺过程的具体科学背景。

(3)只要调查一下有关薄膜的表面分析问题所提出的科学论文的数量就足以表明其内容的丰富和深刻。但是,有关该重要论题的内容在此只能通过一些选出实例来讨论。

最重要的表面分析方法列在图 8 中,它们可以使人们了解技术上的表面的实际情况。

用于薄膜研究的主要分析方法	
TEM	透射电镜
SEM	扫描电镜
X-射线衍射分析	
俄歇深度成分分析	
XPS(ESCA)	光电子发射光谱分析
SNMS	二次中性质谱分析
SIMS	二次离子质谱分析
RBS	Rutherford 背散射分析

图 8 有关的最重要的表面分析方法

当然,不可能要求一个中型的公司全部使用这些方法。在德国 Max-Planck 协会、核研究中心、Fraunhofer 协会和大学的研究所都愿意与工业界合作。但是,有时可能很难使这些研究机构从纯科学的天堂中走下来。因为研究人员必须放弃理想化的先决条件,例如,不是在平的表面而是在弯曲的表面上进行测量数据等等。在有些测试条件下,表面杂质的副作用又往往变成主要的影响因素。

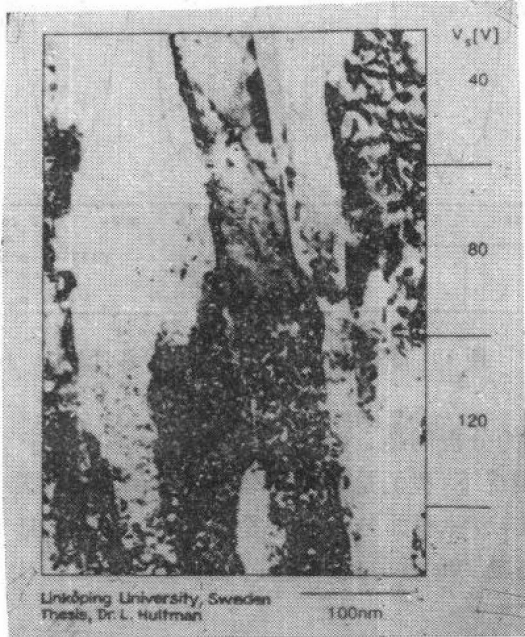


图 9 偏压大小对 TiN 膜透射电镜横截面的显微组织的影响

所以,对准备试样的要求就特别高。要从经过与实际应用情况不同的理想化的预处理过的试样中测得结果并得出结论是很困难的,而且有时往往会是错误的。

让我们来考察三个例子。图 9 表示了一张 TiN 膜的透射电镜的照片。它深刻地表明了为什么在离子镀过程中会产生内应力,而内应力在许多情况下又是有害的。我们能够看到在离子轰击表面的能量增加时,柱状晶之间的缺陷是在不断增加。离子轰击的能量是可以通过改变偏压的大小来控制的。

可以辨认出缺陷是由那些或多或少单独分离的直径约 3nm 的小黑点所构成的,而且偏压大小的细微变化就会造成缺陷浓度的很大的变化。这些缺陷反过来又影响了内应力、韧性、显微硬度和结合力等等性能。这个研究结果对技术上的应用就是极有价值。

第二个例子是采用双靶共溅射法得到钽硅合金膜的 SNMS 成分深度分析情况。人们以前想当然地认为,当基底快速地多次通过沉积区时,在生长的膜层中会得到相当均匀的元素分布。但是,事实却不是这样的(图 10)。利用高分辨力的 SNMS 分析方法可以测出,实际上在所得到的片层之间不存在互扩散作用。因此,我们可以分辨出每一单层的钽膜层或硅膜层。应当注意到,这种表面分析方法有极高的分辨力,它指出每一单层的钽膜或硅膜的厚度只有 2.5nm。

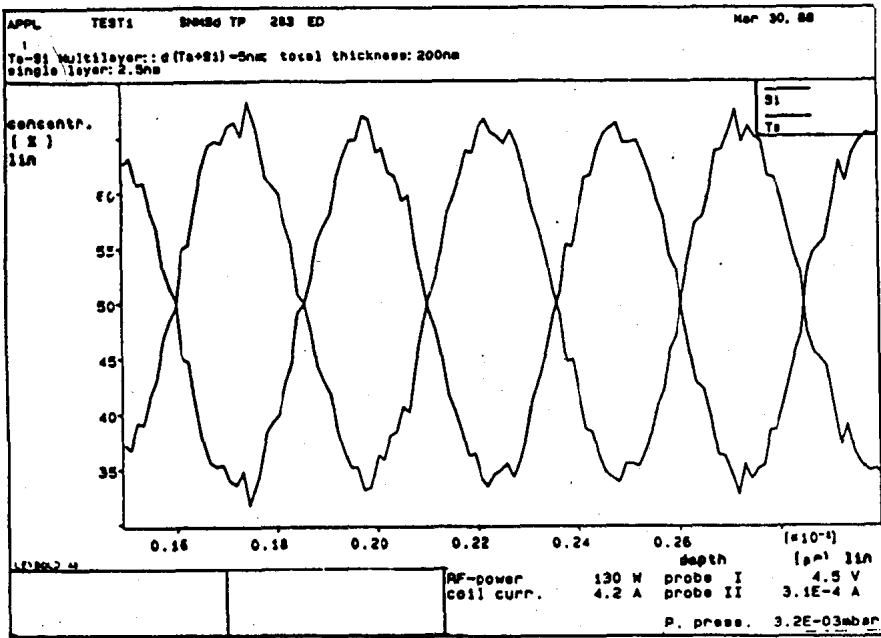


图 10 钽硅合金膜的 SNMS 成分深度分析

第三个例子是有关界面的分析问题。这种分析方法至今主要用于半导体和电子学的研究中,并且有着巨大的潜力。在这种情况下,我们是使用了微电子学的成果来深入研究象结合力等这样的工程技术领域中的难题。不过,这种表面分析方法是昂贵的。图 11 是一种可以联合使用 SNMS 和 SIMS 分析的仪器。它的价格是 100 万马克,并且还需要有受过高层次教育的有专家来操作和有效地使用它。

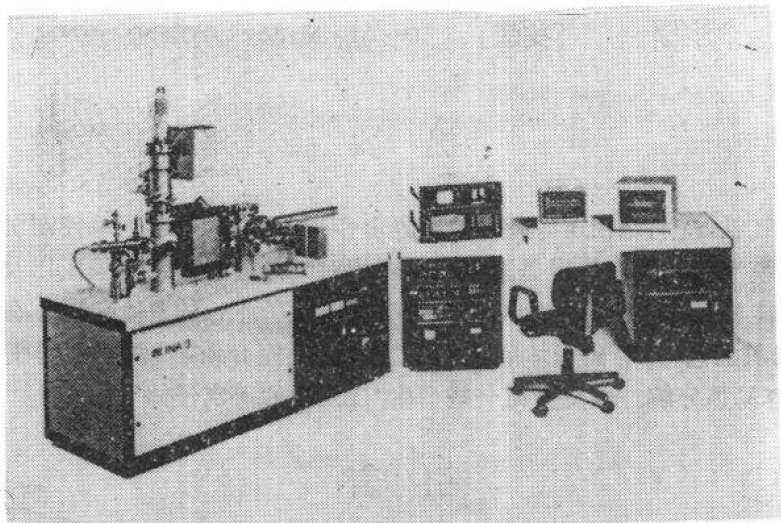


图 11 SNMS 和 SIMS 联合分析仪

科学界与工业界之间必须密切合作。但是,我们一定要考虑实用性,一切研究都要从实际应用出发。日本和美国的发展过程使我们对有关镀膜机和工艺过程方面有了较深刻的认识。

我们现在要进行的将是可以达到工业规模应用的研究课题。我们不可能在一次应用中解决全部难题,而只能在前人的经验上不断地达到更高的水平。

在以前提到过的那些工业部门中引进和改进这些新工艺以至达到工业应用水平曾化掉了许多时间。

基本的是要求企业界敢冒风险,并且要求有主管研究所的积极合作来作科学保证。本次大会提出的宗旨已为我们指出了正确的方向。如果我们沿着这个方向前进,工业界最终能找到可以创造出新成果的领域,还能刺激象航空工业和机械工业等行业,使它们具有更大能力。

使物理学家参与生产工艺是一项困难的工作。但是,物理学家与工程师的紧密合作不仅会获得技术上的成功,而且还会加快技术进步的速度。这一切在目前是具有极其重要的意义的。

参考文献(略)

(顾卓明译 黑祖昆校)

无机薄膜沉积工艺中的等离子气氛

[美国] D · M · Mattox

提 要

使用等离子体气氛,特别是在还有高能粒子轰击作用的情况下,适当地控制沉积参数可以获得性能有所改善的薄膜沉积。轰击作用是通过使基体相对于等离子体带有偏压以及用高能离子轰击表面而实现的。高能粒子的轰击作用能被用来影响薄膜原子生长的各个阶段。在反应沉积工艺和等离子体增强的沉积工艺中,等离子体能被用来“激活”反应介质,以便使它们获得更多的化学活性,或者使它们更容易热分解。本文介绍一些产生“加工用的等离子体”的方法。

引 言

等离子体是含有足够数量的导电离子和电子而在宏观上又是中性的气体介质^[1]。通过直流电场、射频电场和微波场来加速电子而把能量引入等离子体。“加工用的等离子体”是材料处理工艺用的等离子体^[2,3,4]。在加工用的等离子体中,各种气体介质的体积密度和所具有的能量取决于一系列因素,其中包括:产生等离子体的方法、工艺参数和系统的几何形状。在一个加工用的系统中,各点的等离子体的密度和特性会由于电极构造形式的不同、是否存在表面以及其它几何因素的不同而产生很大的变化。

在等离子体气氛中,无机薄膜的原子沉积过程是通过有控制地将原子附加到基体表面上来实现的。这些“附加原子”的来源可能是:(1)热蒸发作用;(2)物理溅射作用;(3)气体分子物质(化学的气相产物);(4)其它的各种蒸发源,如:真空、等离子弧光放电。使用等离子体气氛的原子沉积工艺中最普遍的是:(1)溅射沉积——沉积粒子源是溅射靶;(2)离子镀——同时用高能粒子的轰击作用来改善沉积薄膜的性能;(3)等离子体增强的化学气相沉积(PECVD)——等离子体被用来帮助化学气相物质的分解。

在这些沉积工艺中,等离子体气氛能被用来:(1)提供一个用于表面准备阶段的带能量的气氛(等离子清洗、溅射清洗、等离子反应清洗、离子反应清洗);(2)充当一个能使气体离子加速到具有高动能的源;(3)使凝聚物质离子化;(4)“激活”用于反应沉积工艺的反应气相物质;(5)将物质分子化学分裂,使它们更容易聚合或热分解。“加工用的等离子体”还能被用于通过与基体表面产生反应而形成表面复盖物的表面改性工艺中(例如:离子氮化、等离子阳极氧化处理),和用于加热具有高热函的等离子体中的气体和粒子^[5]。

在薄膜沉积工艺中,基体能放在产生等离子体的容器中,或是暴露在等离子体的“下游”位置(如:在等离子体清洗工艺过程中)。在产生等离子体的容器中,基底可能是放在电极上或是放在受到等离子体作用的位置上,受到各种各样的与等离子体相关的作用,例如,感应的偏压作用、电子的轰击作用和高能量的中性粒子的轰击作用,这些作用就象器壁所受到的一样。基底放在等离子体的“下游”位置上就避免了上述的许多与等离子体相关的作用^[6]。还可以利用分离栅极系统将等离子

体放电引出,并加速到高能状态而用来充当离子束源^[8,9]。束的强度可以通过分离栅极来控制。

等离子体的产生

在加工用的等离子体中,电子的能量是借助电场梯度加速而增加的。用于产生等离子体的最典型的放电类型有:(1)直流二极放电;(2)射频放电;(3)电子发射自持放电;(4)磁控增强放电;(5)微波放电;(6)真空弧光放电;(7)等离子体弧光放电。图1显示了上述一些类型的示意图。

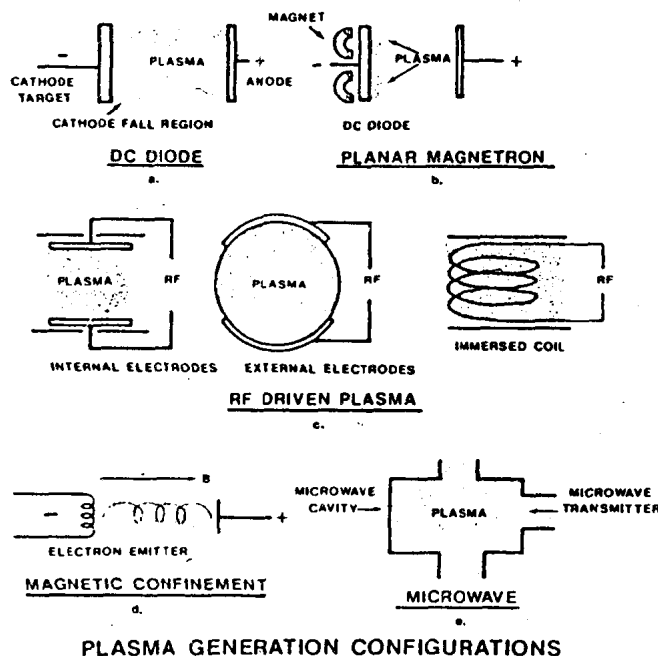


图1 产生等离子体的放电类型

- a) 直流二极型
- b) 采用永久磁铁的平面磁控直流二极型
- c) 射频等离子体有三种电极位置方式,分别为:平面电极放在等离子体中,电极置于外绝缘壁上和线圈放入等离子体内部
- d) 采用磁场来维持电子发射(热电子发射)型
- e) 微波腔等离子体

直流二极放电:直流二极型是由放在低气压中的一个阳极和一个阴极构成的。在阴极上,阴极电位从等离子区的边缘吸引离子,并使它们加速通过阴极位降区撞击在阴极(靶)上。阴极周围的阴极位降区是直流二极放电中大部分位降存在的地区^[10]。等离子区位于阴极位降区的边缘和阳极之间的区域,只有很少的电位降。在直流二极放电中,高能粒子(离子和中性粒子)撞击在阴极(靶)上,引起二次电子发射,它们通过阴极位降区时被加速并与气体碰撞产生了离子和维持了放电过程。表面的二次电子发射系数是取决于表面的化学特性和形貌。氧化物一般要比金属有较高的电子发射系数。二次电子能被加速到高的能量并撞击阳极和系统中的其它表面。这导致系统中表面的广泛加热。直流二极放电需要一个相对来说较高的气压(>10 微米汞气)。

在阴极位降区,一些离子可通过电荷交换过程而转变成具有能量的中性粒子^[11,12],它们就不再受外加电场的影响。因而就有一系列不同能量的离子和中性粒子不断地撞击阴极(靶)。

为了维持放电过程,二次电子必须产生足够数量的离子来补偿损失。如果阳极或接地的表面太靠近阴极,那么放电过程就消失了。这个作用可以用来限制直流二极放电的阴极表面的范围,其方法是只要将不需要轰击的区域用接地的屏蔽罩尽量接近之。巴邢(Paschen)曲线给出了气体中击穿电压与最小的阴阳极距离之间的关系。在直流二极放电装置中,绝缘体表面不能被用作阴极,因为电荷会在它的表面堆积起来,阻止了离子的轰击。

除了产生二次电子发射外,高能离子和中性粒子撞击靶(或其它的表面)还会通过动量的传递过程而引起表面原子的物理发射(“物理溅射”)。被溅射的粒子以比热能高的能量离开表面,在气相中通过相互碰撞而迅速产生加热作用^[13,14]。被溅射的粒子能被散射回靶的表面——这个作用气压越高越明显。一些带有能量的离子碰撞阴极表面后可能变为高能的中性粒子而被反射^[15]。

在直流二极放电装置的阴极回路中,测量得的电流是撞击靶的离子流和飞离靶表面的二次电子流的电荷总和。因而采用阴极电流密度和阴极电压来作为参数,不是采用撞击离子的流量和能量来作为参数。阴极电流密度、阴极电压与气体压力、气体流量一起一般地可用来确定直流二极等离子体处理工艺中所用的等离子体的参数。

一般地,直流二极放电等离子体是“弱电离”的,中性粒子要比离子多得多($10^4 \sim 10^7 : 1$)。这种等离子体中的电子温度较低,而离子的温度则更低。如果在放电中存在气体分子物质,那末许多物质的化学基团会形成,而且其数量要超过离子数。

任何与等离子体接触的表面都会受到离子流、中性粒子流和电子流的冲击。由于电子比离子具有更大的活动性和能量,因而会建立起“壁垒电位”(一般为3—10伏)。这将加速从等离子体中来的离子,从而产生对表面的“离子清洗”作用。

在等离子体处理工艺中,直流二极型装置有许多优点,其中包括:(1)能在较大的范围内形成相当均匀的等离子体;(2)输入功率(Watts/cm²)很高;(3)能量输入很简单、不贵、功率大;(4)可以通过控制装置的几何条件、气压和靶的功率(电压和电流)来实现工艺的重复性;(5)表面溅射能被用作沉积物质源。缺点包括:(1)表面的几何条件有可能造成不均匀的轰击聚焦作用;(2)表面的电子加热作用很广泛;(3)不能用于轰击绝缘体的表面。

射频放电:在电容耦合的射频放电的高频电场中,电子在变化的电场中振荡从而获得能量,并且与原子碰撞产生离子和更多的电子。一般的射频电源工作频率是13.56MHz(美国工业用频率),其正负峰间电位大于1000伏。等离子体相当于低密度的导体,射频场能穿透相当深的距离而进入等离子体。当射频激励电极是一个导体时,在电极上电位处于负半周时其表面会受到来自等离子体的离子的轰击作用。

如果射频电极的表面是绝缘体(背后紧靠导体),则金属—绝缘体—等离子体的作用象一个电容器,绝缘体表面的电位在低的正电位和高的负电位之间变化(这是由于电子有高的活动性而离子有较低的活动性)^[16]。在一个完整周期的负半周中,离子被从等离子体中吸引过来轰击绝缘体的表面。等离子体中的射频电位能使用电容探针来确定^[17]。轰击表面的离子能量可以通过取样孔,使用减速栅和质谱仪来测定^[18,19]。

在电容耦合的射频放电中,等离子体的电位和电极上的屏蔽电位能有几十至几百伏的大小,它们是随时间而变化的^[20]。当电极之间有不同的有效面积时,等离子体相对于一个电极或几个电极还有一个大的直流电位^[21]。

这些因素影响了在射频放电中入射到电极表面的离子能量分布情况^[22]。小面积的电极将得到比大面积电极要高的电压,而电极的电位可以用电路中的外部电容来改变。

耦合到射频放电中的能量大小取决于阻抗匹配(反射功率)和耦合到其它表面时产生的耦合损