

镀膜工艺与镀膜系统配置

伊恩·史蒂文森 弗兰克·泽蒙* 戴尔·莫顿

(美国丹顿真空设备有限公司北京代表处,北京市宣武门外大街6号,庄胜广场办公楼第一座908 北京 100052)

Process & Configuration of Vacuum Coating System

Ian Stevenson, Frank Zimone* & Dale Morton

(Danton Vacuum Beijing Representative office, 908, Junefield Plaza Office Tower 1, No. 6 Xuan Wumen Da Jie, Beijing, 100052, China)

Abstract The latest progress in the optical coating technologies and its vacuum system configuration was reviewed with attention focussed on widely used vacuum deposition

Key words Optical coating system, Thin film performance, The tolerance triangle, Process & configuration

摘要 在过去的 15~20 年中,光学薄膜镀制设备出现了令人瞩目的变化。以前,一般的镀膜机都是纯人工操作,最先进的也只是半自动控制,都必须依靠高水平的操作人员来保证镀膜产品的一致性。而现在,高质量的光学镀膜机已经是一个集成了系列智能化模块(子系统)的全自动系统。这些智能模块(子系统)通常在多个微处理器的指令下结成局域网(LAN),而局域网又可并入整个工厂的自控系统。

用户对设备性能的完善性要求越来越高,现在我们经常见到用户在购买镀膜机的同时,还要求厂家提供相关工艺技术。

本文探讨的是当今光学镀膜系统中可采用的子系统及部件,以及镀膜工艺在部件选择和真空室配置等方面所起的决定性作用。尽管其他技术日渐流行,但鉴于物理蒸镀依然是目前适用性最强、应用最广泛的手段,因此本文中的讨论只涉及物理蒸镀技术。

关键词 光学镀膜机 薄膜性能 公差三角形 工艺与结构

中图分类号:TB75;TQ051.4 文献标识码:A 文章编号:0253-9748(2003)06-0443-06

1 概述

长期以来,人们主要依靠蒸镀法来镀制用于精密光学和眼视光学的电介质薄膜。为加快基片的预清洁和薄膜生长过程中的改性,全世界数以千计的镀膜系统都采用电阻式热蒸发源和电子束蒸发源。一些系统还同时采用颇具动能的离子源,与前两者搭配使用。虽然用磁控溅射法镀制电介质薄膜在某些专业领域非常成功,但由于生产成本居高不下,而且只能满足相对简单的性能指标(溅射薄膜中的压力是工艺设定的参数),使得它的应用范围较窄,仅限于像建筑玻璃镀膜那样的高产量行业。同样,二次离子束溅射法的应用也仅限于那些要求沉积率越低越好的工艺,如:环形激光陀螺仪,波长分隔多路

传输(WDM)滤光片。

众所周知,多数的光学器件的表面都是弯曲不平的,而长距离的蒸发路程有利于曲面镀膜均匀性。结合高沉积率,现代控制与自动化技术(尤其是石英晶体沉积速率控制器和实时光学监控),蒸发系统为多种光学薄膜的镀制提供了切实可行的解决方案。

无论是规格尺寸还是工作性能,制造现代化蒸发镀膜系统所需部件和模块(子系统)的可选性都是有限的。基本上可以将自动化、机械和控制三大部分的制造成本视为整个系统的固定成本,这是因为:(1)这三部分的成本为系统成本的主要构成来源;(2)这三部分的成本不总随系统大小而变。以上两个因素导致了生产成本与系统产能的反比关系。一

收稿日期:2003-06-09

*主要撰稿人:美国丹顿真空有限公司总裁及首席执行官,美国真空镀膜设备协会常务理事

本文译者:冯秀丽,美国丹顿真空设备有限公司北京代表处,010-63108196

般来讲,现代化蒸发系统的产能与生产成本呈几何量级的比例关系。

尽管镀膜系统制造厂家对此观点倍感欣慰,但从另一面来思考,就会发现一个同样显著的经济效益问题:即当造价降低时,系统产能发生大幅度下降,以致系统的规格明显地小于最低标准尺寸(图1)。目前,一台内容积175 L以上,大抽速(空气抽速 $> 100 \text{ L/s}$),具有离子束辅助沉积功能(IBAD)的现代化镀膜设备的价格约为25万美金。估计近期很难出现重大技术突破来大幅度降低现有成本。

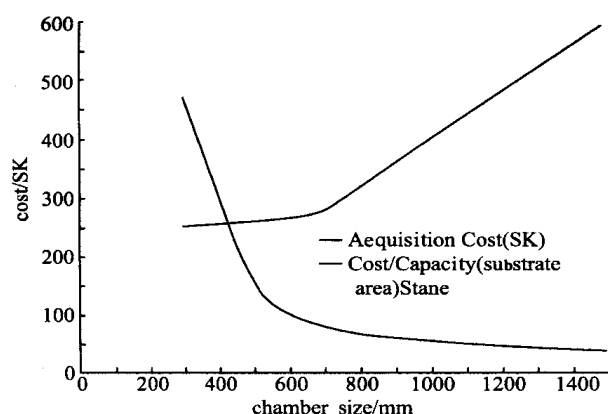


图1 小型镀膜系统单位生产成本大大高于大型系统

Fig.1 Cost per capacity is much higher for smaller systems

在过去几年中,越来越多的用户要求镀膜系统制造厂家提供高性能的小规格、简便型光学镀膜系统,同时,用户对性能的要求不仅没有降低,反而有所提高,特别是在薄膜密度和保证吸水后光谱变化最小化等方面。现在,一般系统的尺寸规格已经在降低,而应用小规格设备进行光学镀膜的生产也已经转变成为纯技术问题。

因此,选用现代化光学镀膜系统的关键取决于对以下因素的认真考虑:即:对镀膜产品的预期性能指标,基片的尺寸大小和物理特性以及从技术上保证良好的工艺重复性。

2 光学性能

要想保证镀膜产品的一致性,我们在开发镀膜系统时一定要确保系统的各个方面相互匹配,这不仅包括设计、工艺和机械、预期的性能指标,还要考虑制造过程中出现的可预见误差。

我们认为:既然镀膜设备是为镀膜生产服务的,那么我们设计制造的镀膜系统就必须适应用户的生

产工艺,而不是让用户改变生产工艺来适应我们的镀膜机。

但遗憾的是,现在使用的许多镀膜系统都是后一种情况,例如,有些生产线上正在使用的是为其他应用而设计的镀膜机,甚至有些时候是厂家先制造出镀膜机然后再去寻找应用客户。不管是何种情况,这样制造出的镀膜机都可能无法完全达到预期的功效,因而很难取得满意的结果。

涉及到真空室的选择和确定,我们认为有以下三个方面需要考虑,而这些问题又都是与系统的制造公差有关:

(1)输入 - 设计 镀膜机的设计如同一道“菜谱”,它规定出了膜层结构、厚度和折射率等指标。如果将以上设计指标严格复制到工艺/设备中,那么标准的输出结果就会达到预期的性能要求。

(2)工艺/设备 在我们看来,工艺和设备也可以统称为按照设计输入实施标准输出功能的一个“黑匣子”。实际上,工艺包括设备硬件,控制软件和一组使机器实现设计要求的指令。在工艺/设备中存在着许多变量,而其中有些不可能被完全控制。这些不可完全控制的变量提高了系统的制造公差,降低了控制膜层厚度的能力,造成标准输出相对于设计的偏差。

(3)输出 - 标准性能 归根到底标准性能输出才是真正最重要的。为了保证工艺的特久性,标准输出应在大多数时间内达到预期效果,即满足用户对薄膜光学性能和耐久性的具体要求。

必须认识到以上三个因素是相互依存的,孤立地看待其中任何一个方面都是不对的,这一点非常重要。如果一个系统的设计和工艺/设备配合良好,那么不管制造公差如何,它都应该总能达到预期性能。然而,如果三个因素中的任何一方发生变化,就必须同时考虑调整其他另两个因素来保证整个系统的协调。例如,对系统工艺的升级会产生制造公差,而且系统越大产生的制造公差也就越大,这就需要改进设计或降低预期性能指标。又如,用户想提高预期产品性能而只是简单地改进了设计,表面上好像达到了用户的目的,但如果新的设计对膜的厚度很敏感,除非改变工艺来降低制造公差,否则产品不太可能长期达到新设计的产品性能要求。

在评估工艺公差时必须考虑如下一些因素:

(1)厚度监控:设计中每一层膜厚的精度都受到控制仪器本身精度的限制,一般我们讲的控制仪器

是石英晶体微量天平 (QCM) 或光学监控仪, 或两者同时使用。石英晶体微量天平的精确度大约是 2%, 而一个设计良好的光学监控仪, 精度能达到千分量级。

(2) 膜厚的不均匀性: 无论监控仪精度怎样, 它也只能控制真空室里单点位置的膜厚, 一般来讲是工件架的中间位置。如果在整个支架上的膜厚不是绝对均匀的, 那么远离中心位置的基片就无法得到均匀一致的厚度。虽然修正挡板能消除表现在某固定位置上的不均匀性, 但有些膜厚度的变化是由蒸发源的不稳定或膜材性质的差异而引起的, 所以几乎是不可能消除的, 但对真空室的结构和蒸发源的恰当选择可以使这些影响最小化。

(3) 时间变量: 真空室里的沉积条件随着时间发生改变是常见的现象。在一轮运行过程中, 蒸发源的特性会随着膜材的消耗而改变, 尤其是设计中涉及多层镀膜时, 如果工艺过程需持续数个小时, 真空室的热梯度也会上升。同时, 当真空室内壁因沉积而变“脏”时, 不同轮次的工效逐渐产生差异。这些因素虽然是渐进的并可以进行补偿, 但依然应该将其视为系统公差的一部分。

图 2 中的简单事例证明了公差考虑的重要性。图中显示的是两种减反射膜 (AR) 镀制方案的设计。两个方案都可在 (450 ~ 650) nm 波长范围内满足反射系数 0.3% 的要求, 表面上看 A 方案 (5 层, $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$) 应为首选, 因为它波长范围比 B 方案 (3 层, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2/\text{MgF}_2$) 更宽、更平。但是, 经验告诉我们 SiO_2 镀膜的公差会比较大。在一个大真空室中, SiO_2 镀层的误差为 3%, 而 MgF_2 镀层的误差可被控制在 1% 以内。当在这两个误差值的基础上比较设计方案时, 可以看出 B 设计可以达到更好的效果。

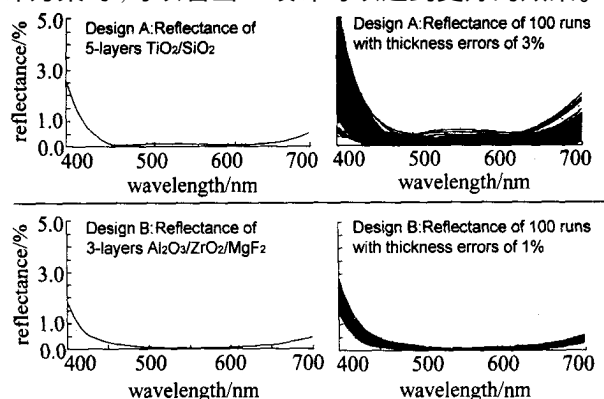


图 2 两种减反射膜镀制方案

Fig. 2 The errors of our ways

(4) 湿度漂移: 薄膜一般多孔, 使得它们的属性在诸多方面低于块状材料。其中一点就是潮湿条件下, 薄膜的微观空间充满水蒸汽, 而在相对湿度降低时变干。水分的存在与否改变了薄膜的有效折射指标, 产生了众所周知的“湿度漂移”现象, 即薄膜的光谱改性。沉积条件对镀膜的多孔性具有很大的影响: 人们早就通过基片的高温 ($\sim 300^\circ\text{C}$) 来增加薄膜的密度。而近年来, 离子束辅助沉积 (IBAD) 法也被用来在环境温度下提高基片的密度。

显然, 对设备/工艺因素的考虑不应仅仅停留在部件基本功能的水平, 对每一部件的选择都应首先仔细评估其对制造误差和工艺控制的影响。

3 系统考虑因素

要设计一套能满足特定性能指标的现代镀膜系统, 需要考虑的问题如此繁多而复杂, 以至不知从入手。我们建议最好首先考虑膜层的预期性能要求和被镀基片的本质特性, 然后根据以上两个问题的结论展开设计工作。

首先, 镀膜设计包括预期薄膜应具有的光学和机械特性, 这些特性是选择膜材、蒸发源的类型以及镀膜条件的基础; 其次, 要保证生产的一致性, 质量控制 (对光学膜厚的控制) 是关键, 它往往决定膜厚监控仪、基片转速以及蒸发源布局的选择。同时, 基片本身对选择过程的影响是不可忽视的, 因为有些材料无法加热, 且基片的尺寸和形状又往往决定旋转系统的类型和均匀屏蔽保护。

3.1 抽气系统

真空机组的组成部件必须认真选择, 以便在规定时间内达到预期的真空度。有效抽速可以根据真空泵的规格和真空室的流导计算出来, 但被抽气中大部分都是水蒸汽时, 如对水气的抽速低, 就会影响到系统的抽气时间。所以在预见到被抽气体中含大量水汽时, 一般会采用迈斯纳挡板来作为辅助的低温装置, 用以提高系统对水汽的抽速。低温泵具有高效、快速和清洁无油的特点, 因而成为中小系统中高真空泵的理想选择。大型真空室一般会有较大的热负载, 这些热量来源于工艺中的气体和热辐射, 这会造成低温泵在冷却方面的困难。低温冷却挡板与扩散泵的传统组合目前依然是最灵活的真空抽气机组, 在大型系统中经常使用, 特别是涉及到热处理工艺的时候。对于粗真空泵的考虑也不能仅限于简单的抽速方面。对于扩散泵机组来说, 扩散泵的排气

压强与机械泵的有效抽气压强之间存在空档,需要另外的抽气设备进行弥补。而低温泵可以承受更高的压差,因此其前级采用机械泵就足够了,只是在水汽较重时应选用双级机械泵。

3.2 蒸发源

最简单的方法就是将蒸发材料放在筐状或舟状电阻式蒸发源内进行加热。这些低压蒸发源简单、经济、可靠,可以做成各种各样的大小、形状并具有不同的电特性,例如用来沉积金属薄膜的小线圈也许只需要 50 A 的电流,而沉积红外线滤光片时,基膜层的厚度远大于可见光膜层,就需要用到高达 1000 A 的大容量蒸发舟。

很多材料不能用加热的形式蒸发,包括大多数常用于可见光和近红外(NIR)镀膜的绝缘材料,这种情况下,必须采用电子枪。电子枪有多种尺寸和类型可供选择,多坩埚电子枪可采用一个源对多种材料进行蒸发,这种枪在镀制多层膜且膜层较薄的工艺中应用效果很好。当复杂的设计需要每种材料用量较大,或每个源都需要占用不同的位置时,可以选用单坩埚电子枪。电源的大小更多地取决于蒸发材料的导热性,而不是其蒸发温度。电源功率一般在 4 kW 到 10 kW 之间,对于大多数的绝缘材料,4 kW 就足够了;而如果想达到很高的沉积率,或在一个很大的真空室内对导热材料进行蒸发时,也许需要 10 kW 甚至更大功率的电源。

要保持 e 型电子枪蒸发绝缘材料的稳定性,最重要的是要拥有一个高品质的束流扫描控制器。传统的束流扫描控制器基本采用模拟波形,它可以从横纵双向驱动束流,还可以调节振幅和频率。最近有一种新的方法是将坩埚分成象素,并允许在每一点上停留的时间有所不同。不管是哪种方法,扫描控制器必须拥有多种供控制程序进行选择的预设模式,才能成为全自动控制系统的有机组成部分。

3.3 工艺条件

预期的沉积条件显然对于多数真空室部件的选择起着重要作用,包括加热器,离子源,辉光放电器,压强计/流量计,残余气体分析仪(RGA),甚至抽气系统本身的选择也会受到工艺温度、反应气体的加入以及离子束辅助沉积(IBAD)的应用等因素的影响。提高基片温度有助于薄膜性能的优化,但会使工艺更加复杂,也更加耗费工时,而且对如塑料等基体材料完全不适用。直流辉光放电和离子源具有一些相同的功能,比如对于简单的基片预清洁,辉光放

电就足以胜任;如果采用离子源进行离子束辅助沉积(IBAD),它同时可以有效地完成基片的预清洁,而辉光放电就多余了。辉光放电需在 1 Pa 压强范围内工作,因此需要流量控制器和一个低流导高真空旁路阀将高真空泵与进口高压隔开。相反,离子源工作所需要的气流量和压强则低得多,因此在进行离子束沉积的过程中就需用大抽速来维持尽可能低的压力。有些工艺对污染很敏感,此时一台残余气体分析仪就非常有价值,因为它可以揭示出远低于室内总压强的不良气体或蒸汽的存在。

3.4 基片及工卡具

在决定如何支撑及旋转基片时,基片的尺寸、数量、日产量,允许的卡具标记,热膨胀系数,装卡方式,热冲击阻抗,除气特性,厚度均匀性及特殊的要求都是很重要的考虑因素。如果处理过程中需要加热,就要同时考虑卡具和基片的热膨胀及空间公差,以避免在加热过程中基片跌落或变形。

为了保证膜厚的均匀性,工件架的旋转采用公自转或行星运动是最好的解决方案,尤其对有曲线形状的基片。实际上,对于表面曲率很大的工件来讲,只有这种方法才能最大限度地降低基片自身的各个位置以及同一轮的各个基片之间的膜厚差。可惜的是,行星式工件架系统限制了真空室的装载量,因此,这种追求质量的方式的代价是容量和工作效率的损失。

假如只采用公转就可以达到设定的均匀度,那么采用球面帽罩型工件架就会使真空室内空间得到有效的利用。无论采用哪种方式,都需要某种均匀屏蔽来修正几何学中所固有的膜厚差异。理论计算可以为这些屏蔽提供一个很好的开端,但它们的最终形状是由实验决定的。

3.5 膜厚的测量及监控

最直接的镀膜控制方法是石英晶体微量天平法(QCM)。这种仪器可以直接驱动蒸发源,控制沉积速率和保温时间,通过 PID 控制循环驱动挡板,保持蒸发速率。只要将仪器与系统控制软件相连接,它就可以控制整个的镀膜过程。还可以选用相互隔离的双重传感器探头,它既提供了安全备份,而且还可用来进行多层厚膜的镀制。但是,QCM 的精确度是有限的,部分原因是由于它监控的是被镀膜的质量而不是其光学厚度。此外,虽然 QCM 在较低温度下非常稳定,但温度较高时它会变得对温度非常敏感。在长时间的加热过程中,很难阻止传感器跌入这个

敏感区域,从而对膜层造成重大误差。

光学监控是高精密镀膜的首选监控方式,这是因为它可以更精确地控制膜层厚度(如果运用得当)。精确度的改进源于很多因素,但最根本的原因是对光学厚度的监控。光学厚度可以采用直接监控,即在基片上进行测控,也可在单独的监控片上进行间接测控,间接监控的优点是灵活性强,但在应用时必须能够容忍监控片与基片间的差异。多年来,人们发展了很多有效提高光学对膜厚变化灵敏度响应的理论和方法来减少终极误差,典型的光学监控软件提供了反馈或传输的选择模式和大范围的监测波长。波长可以利用窄带滤光片或单色仪进行选择。虽然单色仪的价格相对昂贵,但它可以很宽的范围内提供连续可选的波长。另外,还可采用带多重光栅的单色仪来选择波长。紫外区、可见光区和红外区都有其与众不同的特性,因此必须认真选择光源及探测器,使之与监控仪的工作波长相匹配。

3.6 系统

真空室内的大部分部件都可依据前面的讨论进行选择。对于真空室的规格,大多数的制造商都能提供全范围的标准规格,但有时特殊的应用需要有非标准设计。在设计中,考虑操作者如何能方便地更换、调整那些需要定期检测的部件是很重要的,如蒸发源、监控片,当然还包括工件架。同时,电器维护、冷却水用量、特殊用途要求、工作流程及专门的辅助设备都应在设计阶段加以考虑。在系统控制方面,至少应该有监控及数据获得(SCADA)局部应用程序,参见图3;在用户现场,也许会有其他的界面

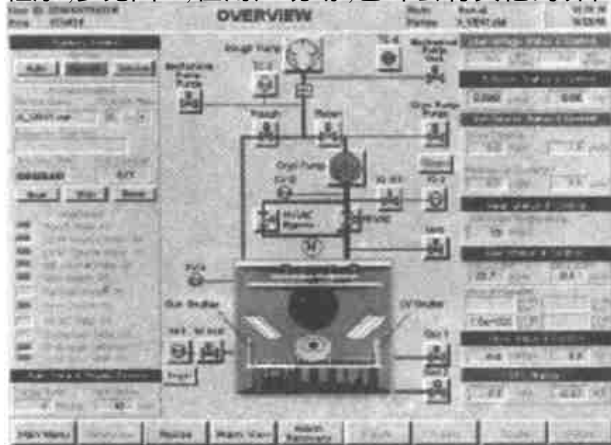


图3 通过视窗图形界面来实施对整个系统的控制已经成为常见的操作方式

Fig. 3 It is common for full system control to be available through a Windows based graphical interface

连接方式,例如与用户的局域网连接;最高级别的设置应是通过国际互联网与设备制造商进行连接,这样制造商就可以对系统的性能进行监控,并提供远程工艺诊断服务。

4 应用

光学镀膜系统的应用很多且各有不同,很难在一篇文章中将其一一罗列。在这里选择了两种最流行的系统进行介绍:一种是眼视光学镀膜系统,可用于眼镜片上减反射薄膜的大批量生产;另外一种是更为通用的精密光学镀膜系统,可以用来镀制更复杂更精密的薄膜。

4.1 眼视光学

眼镜及太阳镜,主要为塑料基片,大多数设计都是针对 SiO_2 和 TiO_2 的蒸镀,因此电子束枪就成为首选的蒸发源,其所需的电源工作功率至多(4~6) kW。可以用电阻式蒸发源来蒸镀增加附着力的底层膜(Cr),或防水膜(高蒸汽压聚合物),此类蒸发源通常很小,只需很低的电源功率2 kW。系统一般含加热装置,但只用于初始加热来促进除气作用,所以需要的功率也很低(1~3) kW。系统中,离子源(冷阴极型或端部霍尔型)在镀膜工艺的工序开始前,用低能量轰击和对基片表面的改性,对提高膜的附着力起到了决定性作用。

为了把基片析出的大量水蒸汽抽走,对水汽的大抽速是很关键的。因此这些系统一般都配有辅助低温泵。低温泵的尺寸一般在700 mm到1250 mm之间,较大的系统一般采用扩散泵抽气机组。较小



图4 从这张眼视光学镀膜机的照片中可以看到球形工件架,电子枪及离子源

Fig. 4 Domed calotte, electron beam gun and ion source are visible in this ophthalmic coater

的系统大部分都采用低温泵或分子泵。为了使批次产能最大化,工件架一般采用只有公转的球面帽罩型结构(图4),而在镀制周边较薄的非平光眼镜片时全部采用倒置方式。为了色彩的均匀性,护目镜(太阳镜和安全镜)的遮盖需要特殊的屏蔽。在这种应用中,膜厚控制精度在2%左右就足够了,沉积速率和最终指标都由QCM控制。

4.2 精密光学

精密光学镀膜市场可根据不同产品和工艺要求粗略地分成两大类,从工艺的复杂程度来看,最低端的镀膜设计类似于眼视光学的应用,而最高端的需要设计数十层甚至几百层的镀膜。高端应用需要蒸发源对材料具有极大的容量,可能在一个真空室内要装置多个大功率蒸发源。另外,由于误差的累积会导致薄膜的光学性能发生退化,为了使这种退化最小,就需要更有效的镀膜控制。鉴于热应力可严重损坏低温泵的冷却系统,精密光学镀膜系统基本上采用扩散泵。

为获得更为均匀的镀膜,精密光学镀膜系统的真空室内常常会配置行星工件架(图5),但这却使

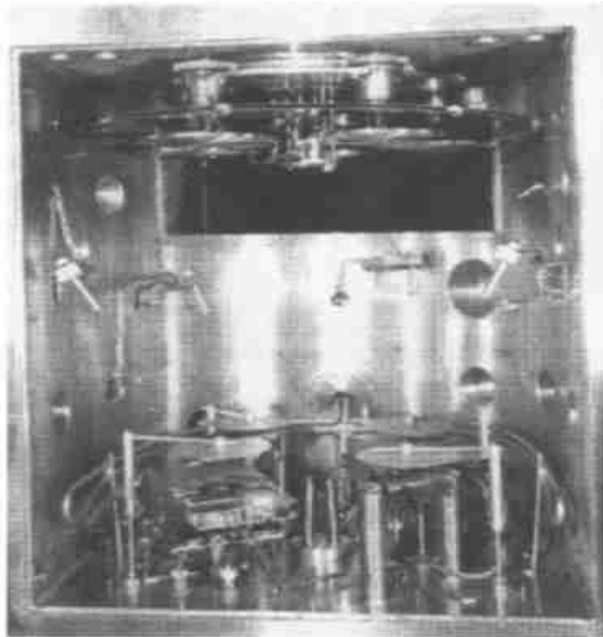


图5 一台典型的精密光学镀膜机比应用于其他方面的镀膜系统需复杂得多:行星式工件架,多个石英晶体探头及4个蒸发源

Fig.5 The greater complexity typical of a precision optics machine: planetary rotation, multiple QCM sensors and 4 sources

得装载量大大降低。在极度弯曲的光学件表面上(如:半球状表面)镀膜需要特殊的卡具;同时,在很多情况下,蒸发源的位置要根据每一种膜材来进行最优化设计。精密光学镀膜机一般需要更高的工艺温度,一台标准的精密光学镀膜系统可包括高达15 kW的放射热量。离子源已成为精密光学镀膜的理想应用技术,它为镀制湿度稳定薄膜提供了一种工艺方法,而且使薄膜材料在内应力,折射系统及化学计量等方面的性能更加稳定。

从控制的角度来看,大多数的高精度光学镀膜机都配有石英晶体测控仪和光学膜厚监控仪,前者用于监控沉积速率,后者则用于最终效果的测控。最复杂的设备还配有宽波段监控性能,从而可以对镀膜情况进行实时评定。如果出现误差,剩余膜层可被重新优化,使工作性能恢复到出现误差前的水平。

5 总结

随着先进设备的增加,不断对现代光学镀膜系统的性能提出更加苛刻的要求。为最大限度地保证系统的可靠性和工艺的重复性,工艺已成为部件选择和真空室配置的决定因素。在设计光学镀膜设备时遇到的诸多问题需要系统制造商发挥自己在工艺技术、真空技术、系统集成、网络及软件等领域的技能。现代镀膜系统,在运行中无须任何人工操作(图6)。透过历史可以看到未来的征兆:在镀膜行业中,镀膜机用户对工艺控制、系统可靠性和智能化的要求将会越来越高。

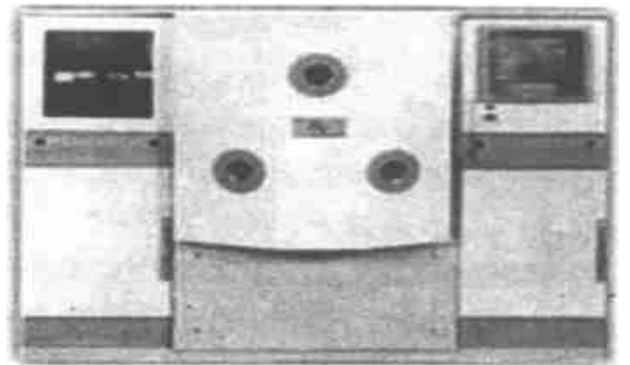


图6 作为“交钥匙”工程的现代镀膜系统在运行中无需任何人工操作

Fig.6 A modern turnkey system requires no intervention by an operator