

光学镀膜领域内的问题

薄膜可以改变光学元件的物理—化学特性并广泛应用在光学机械工业上。借助薄膜可以调节通过光学元件光的方向、强度与光谱成份。现在难于找到不镀膜的光学元件。

薄膜光学—光学的新分支，在最近几年由于出现新的方向，例如量子电子学、彩色电视、全息学而使它迅速发展起来。在第十个五年计划里要求很大的各种各样的镀膜。为了制备这些膜必须在最近几年解决镀膜理论与镀膜技术的一系列难题。它们之中的某些难题已经顺利地解决：拟制光谱特性的计算方法、找到光学性能依赖于厚度和折射率的关系。在制备复杂薄膜时留下来未解决的仅仅是合成问题——按给定的光谱性能来寻找一定的膜层结构。在最简单镀膜的情况下积累的经验能按给定的光谱性能确定镀膜成分。

镀膜技术处在另外的状态，制备新的薄膜是与它有关系的。我们研究在这领域内的主要问题及其解决的途径。

尽管大量的多样化，但是所有镀膜可分为三种：

1. 增透膜

长期为窄光谱区完成有效的透射并且是选择性的。在最近几年出现了消色差透射，这种透射在宽光谱区内使反射从一个表面降低约 $\sim 0.5\%$ （正如在全可见区）。现在制备两种波长的增透膜。这两种增透对许多现代仪器来说是不大有效的。在下列新的镀膜产生要求。

消色差膜在宽区域内（包括紫外、可见与红外）从一个表面反射约 0.2% 。在中

级复杂的仪器中（有20种元件）应用这种膜能提高光透射 20% 。那种效果借助在少的材料消耗下简单的工艺过程便能达到，当时正像依靠降低玻璃吸收来提高透射 $2-3\%$ 需要巨大的材料消耗。以由不均匀层的多层膜为基础可能制备那种增透膜。对这些目的来说混合物质组成的膜是最有前途的，这种物质能制备可变成成分并在宽范围内改变其折射率的膜层。那样的薄膜可以用化学方法容易地从溶体中制备。最有前途的和生产率最高的是真空镀膜方法，这种方法处在由于没有装上新的蒸发工具的设备的深入研究时期。

具有 0.01% 反射任何给定波长的有效透射膜是与能以高精度调制膜厚的方法的建立有关系。

几种波长同时透射的薄膜，现在还制备两种波长的透射膜。量子发生器的频率调节方法的顺利发展要求在最近时期在元件的一个表面上涂镀具有几种波长用的最小反射为 0.05% 的薄膜。那样薄膜的制备只可以以多层膜为基础而实现。

吸湿光学材料的增透膜。在最近几年这些材料广泛地用在仪器上首先是用在大型仪器上。这种材料作成元件其表面很快地受到潮湿而破坏。所有膜层都有多细孔的结构并且大气的水蒸汽很快地通过薄膜扩散进去，导致元件表面受破坏而膜层从基片脱落。由于大型仪器经常在严酷的气候条件下使用，制备稳定镀层的问题还是复杂得多。在那里强烈地产生腐蚀。密封类似的仪器是很困难。在这种情况下制备稳定的膜层（通过镀保护膜层（即三防膜——译者注）或者使元件的表面变形）可以达到。

最有效的防护涂层看来是由具有高憎水特点的有机和硅有机材料组成的薄膜。但是由于一系列的原因这样的膜层仅能以薄膜的形式来涂镀，这些薄膜只瞬时防护另件免受破坏。表面变形博得注意。方法的实质在于，物质的表层经过化学反应变成不溶解抗潮的材料。正如在 NaCl 晶体表面上可以用阴离子 ClO_3^- 代替 Cl^- 离子来制备具有降低吸湿的 NaClO_3 层。

所有研究透射的涂层具有低反射性能；反射系数值已变成与光散射系数可比量的值（ $\sim 0.2\%$ ）。很清楚，在那样的光散射下得到低反射是困难的。在最近必须大约从数量级减少薄膜的光散射并且使这个数值接近于 K8 玻璃表面的光散射（ 0.02% ）。在解决这个问题的时候我们碰到许多基本性能的困难。问题在于，薄膜具有粒状的结构并就本身的性质来说是散射介质。它们穿上充满空气的细孔系统并且在颗粒—细孔边缘上折射率的差异可达到高值（特别对 TiO_2 , ZrO_2 , ThO_2 薄膜而言，它们的折射率达 2—2.6）。因此薄膜具有高的光散射。很清楚，可以通过制备具有低疏松度的整体硬实的薄膜。对化学薄膜来说在升高温度下烧结法是最有前途的。对不能高温加热的低熔基片来说由稀薄溶液制备的薄膜值得注意。对真空方法来说从分子束涂镀与溅射的慢过程是较有前途。

2. 反射膜

这里需要两种反射膜—选择，反射窄光谱区与具有在宽大光谱间隔内高反射。现有的窄带反射镜按其光谱性能总是不适合工业要求。在最近几年必须对给定的波长提高反射系数约为 99.98% 而且反射边缘更陡，接近于 Π -形的反射镜。对在偏振光下工作的许多现代化仪器需要具有对每种分量高反射的反射镜。这个问题的解决主要是与高精度的测量仪器的制造有关系。最有兴趣的是具有在光入射的各种角度下（ $0-45^\circ$ ）高反射的反

射镜。制造这样的反射镜是够难的，因为反射值是与干涉的出现以及膜厚有关。楔形薄膜与基片的球形表面为这目的是最有前途的。

现在仅把对腐蚀介质不大稳定的金属涂层用作消色差反射镜。在这些条件下稳定的反射镜可以由抗化学难熔物质（ SiO_2 , ZrO_2 , ThO_2 , HfO_2 ）构成的多层膜为基础而制成的。这样反射镜的样品已经能制备。最近必须有点儿提高反射系数，扩大光谱区，而最主要的是拟制简单稳定的工艺。

与薄膜镜片的同时激光技术开始应用金属反射镜，因为许多的金属在足够宽大光谱区内具有高反射。试图用溅射法有点儿提高介质膜的反射。经验表明了，只有在严格遵守膜层厚度的情况下可以得到明显的效果，这个与大的实验困难有关系。但是降低反射很少。最有前途是通过改进抛光程序来改善金属表面的质量。

许多金属（Cu, Ag）很快地受到大气破坏。提高这些金属的化学稳定性的问题渐变为迫切并且可以通过加入微小的补充物使金属表面变态来解决。众所周知，微小的补充物（百分之几）已经强烈地改变金属的物理—化学特性，而对反射没有明显的影响。

3. 滤光片

现有的各种型号的滤光片主要满足工业的需要。今后的工作是光谱和使用性能的改进有关系。但是对新方向来说必须在最近几年制备两种滤光片。这首先就是半宽 5—10 埃的稳定窄带滤光片与具有足够高透射的滤光片。小的样品用阴极溅射法来制备。随着样品尺寸的增大涂层渐渐变成比较不均匀。同时对窄带滤光片要求很均匀的涂层，其厚度以高精度再现。很清楚，这样的工艺问题可以用离子—等离子体（плазменный）方法比较顺利地解决。

第二种仍是光栅滤光片。其工艺处在拟制阶段。减少刻线的宽度的问题及其制造很

均匀的形状是最重要的。

复合膜。它们仍是最简单膜层的组合。包括对可见光的各种波长用的三种窄带反射镜的镀膜是典型的。最近需要制备相当宽的光谱区(0.2—10 μm)用的类似涂层(包含低与高反射段)。

这样涂层的制备可以由30—40层组成的多层薄膜为基础并且确定为具体的光谱特性曲线。

为了顺利解决问题必须进行大量的物理—化学研究。最有意义的仍是下列问题。

膜层的附着力。由于制备宽光谱区用的多层膜层需要增大膜厚。大家知道,附着力(粘着力)随着厚度强烈地下降。因此多层厚的涂层现出许多裂纹并从基片脱落。附着力是由物质的化学键与膜的结构所确定。在一些情况下主要的镀膜方法所表征的结构起着决定性作用。现在有两种制备薄膜的方法:化学与真空;膜的形成机理与结构是不一样的。

化学膜由溶液凝结作用和水解而制备成胶体粒子与基底相互间总以牢固的化学键相附着。反应结果在膜中产生两种力:与基片平面平行的内聚力和垂直于基片平面的附着力。随着厚度的增加薄膜趋向形成固有的结构,而附着力妨碍这种趋向。在这些力相互作用过程中产生大的拉力。在确定厚度的时候它们变成为与附着力可以相比较而发生薄膜的破坏。很清楚,为提高强度必须减少拉力。通过加热焙烧薄膜是达到这目的的有效方法。因为在加热时同时增大内聚力与附着力。在每种具体情况下必须在实验中找到某温度,在该温度下产生附着力最大增加量。表面活化方法如化学方法也好,或在高压放电中处理也好都值得注意。溶液凝结性能与水解速度对附着力的影响,而这些过程照样地与溶液的浓度和大气温度有关;水解和凝结的合理条件的实验选择是附着力研究的必要环节。

从气相蒸镀薄膜的情况下,第一批粒子

以较弱的范—德—华(Ван-дер-ваальсовский)力固定在基片的个别活性段上。首先这样的膜层直接紧贴着基片并且乃是疏松的形成物。随后的淀积是产生在这些第一批粒子上并形成结晶。

以后薄膜是由以吸附力相互结合的微晶所形成。这种结构的特征是小附着力并因此薄膜的特点是弹性。与化学镀膜的不同点是在这里(化学镀膜里)附着力起主要的作用。它们的增高也可以通过加热或者在加热的基片上蒸镀薄膜的方法和通过表面活化作用来实现。

在真空中用离子处理的方法进行表面活化,随后在同样的真空系统中淀积薄膜是重要的,由于除去了表面被大气组份所纯化。

膜层的整体性:直到现在制备的薄膜具有疏松结构并有许多缺陷。因此它们具有低的辐射强度,对气体产物容易渗透。许多研究者从事于整体薄膜的制备。目前制备这样的薄膜还没有成功。很明显,制备它们是困难。问题在于,密实的物质是整体性的局限。而真实物质富有分子缺陷,通过它们可以扩散最简单的分子(O_2 , H_2 , H_2O)。扩散的速度小,但是在这些层用这种方法可以移送大量气体产物。因而,甚至理想薄膜也是透气的。另外薄膜有其他的缺陷(气孔、裂纹)。至今不可能全部解决这些缺陷,并且可以说仅降低它们的浓度和减少扩散速度。基本物质通过气孔扩散,因此首要的任务—降低薄膜气孔率。经验表明,用阴极溅射涂镀的薄膜具有最小的气孔率。离子—等离子体方法在这方面是有希望的。在用化学方法制备难熔材料(SiO_2 , Al_2O_3)的时候可以用高温焙烧降低气孔率。用真空方法时制备密实态的第一层是很重要的。为此希望有充分活性的表面。从离子抛光大可以预料到最有效的活化作用。

提高辐射强度。强大的光线引起薄膜破坏的机理目前还没有充分研究。但是,众所周知,在薄膜中储存的光能变为破坏薄膜的

象 质 判 据

摘要 图象质量至少与三个因素有关：影调再现，锐度和颗粒度。实验表明，当目视检查再现时，重要的因素不是客观影调再现，而是主观影调再现。当用良好的主观影调再现时，在颗粒度不明显的情况下观察，以系统和视觉的 MTF 加权乘积度量的锐度是与像质有密切关系的。当颗粒度明显时，建立在信噪比基础上的判据与像质有密切的关系。

影调再现

客观影调再现：

图 1 中用虚线表示了客观影调再现曲线，它是一条以再现密度作为不同景物单元对数发光强度的函数曲线。每个景物单元的发光强度是用该单元射到相机或人眼的单位立体角内光量来度量。与人眼有相同的相对光谱灵敏度的光电光度计可精确测量发光强度。最初假定最佳复印照片所需要的客观影调再现应该用虚线表示，其斜率为 1。因此，原景物的发光强度将正比于再现的密度值。然而，实验表明，当目视检查再现时，重要的因素不是客观影调再现，而是主观影

调再现。

主观影调再现：

“主观影调再现”一词是指初始景物亮度的再现。亮度是光引起的主观视觉感觉的大小，而发光强度是光的大小或总量。照片上不同单元亮度对相应的景物单元的亮度之间关系曲线称为主观影调再现。亮度不能用仪器直接测量，但能用心理学度量方法确定。显然，亮度与发光强度不是线性关系。这种非线性是很明显的，因为观察再现时使用的发光强度与周围的发光强度通常是与原景物的强度不同。例如，日照景物的发光强度大约是电影院里放映的屏幕像的 500 倍，大约比普通室内光照下反射型印刷图像发光强度高 100 倍。因为再现系统的目的是产生

热能。靠结构缺陷的吸收中心进行能量积累。除此，在缺陷的地方削弱结构的连结并在那里开始破坏物质。因此，对提高光强有两种方法。第一种方法采用耐熔氧化物，第二种方法一提高薄膜的整体性。现在我们合成熔化温度为 2000—3000℃ 的物质。希望合成熔化温度为 4000—5000℃ 物质。

镀膜工艺：在大多数国家用真空方法镀膜。在美国和西德还是采用化学方法。它们之中每种方法有它自己的优点，而且它们是相互补充。完全可以采用合成物质的基本原理—从溶液与气相中制备。同时从溶体中可以制备高纯的物质。很遗憾在最近几年化学方法很少引起注意。

不论涂镀的方法下列的问题是工艺方面

的首要问题：

1. 在由吸湿材料作成的大另件上的镀膜。这个问题的顺利解决可以通过离子抛光与真空方法的结合和通过用拉伸方法从溶体中涂镀薄膜。

2. 在复杂结构的产品上镀膜。用阴极溅射与拉伸方法最合理地解决这方面的问题。

3. 装置与设备。为制备具有所需的光谱特性的薄膜需要有精度为 0.01% 测量反射的分光光度计，测量复杂表面反射的仪器，能使离子抛光与喷镀相结合的混合真空装置。

译自“Оптико-механическая Промышленность” №10, 1977 стр.43.

〔施评治 译 林开华 校〕