

# 国外光学镀膜技术发展动向

广 纪 编

薄膜光学是光学的一个重要分枝。十七世纪中叶发现的所谓“牛顿环”是现代薄膜光学的萌芽。十九世纪初制成了第一批减反射膜。随着近代科学技术的发展，薄膜光学也取得了很快的进展，尤其是六十年代以来，激光技术的出现使它获得了巨大的推动力。目前光学薄膜已经广泛地应用到各种科学技术领域，例如天文物理学、宇航技术、红外物理学、光学仪器，以及激光技术等，它已成为光学技术中的一个不可缺少的专门领域。最近几年来有了飞速的发展。目前，已出现过上百层膜的滤光片，而且这类器件的生产正朝着完全自动化的方向发展。

## 一、光学薄膜的作用

光学薄膜的作用就是使经过光学零件透射或反射的光发生光强度的改变或光谱能量分布的变化。总的来说，主要的作用有两个方面：改善光学仪器的性能；获得单色化的光。其作用原理是利用光在膜层内行走的光波干涉。

所谓改善仪器的性能。主要是指改善光学系统的能量传递性质和成像质量。例如，增透膜是减少光学另件表面因反射而造成的光能量的损失；反射膜（铝或银等）是为了增加某个光谱区内光的反射能量，又如法布里—珀罗干涉仪或受激光发射器上的高反射镀膜也是为了提高通过的能量。光学仪器中采用中性膜或半透膜，主要是根据仪器总体要求分配的能量来定的。在仪器中，采用干涉滤光片有时是为了减少因色差带来的成像误差，如干涉仪中是为了提高干涉图案的清晰度。近年来有些非球面的制造者已采用镀膜来修改反光镜的曲率，以求得高质量的成

像系统，这些曲率有的是抛物面，双曲面等二次曲线旋转体，但也有高次曲线的旋转体。由于膜层厚薄的控制有问题，这个方法在光学工业中的广泛应用还有困难。

获得单色化的光，指的就是各种干涉滤光片，包括线状的、带状的和宽带状的。干涉滤光片作为单色器有下列两点优点：

(1) 单色化程度比吸收玻璃滤光片好，而且透过率高；

(2) 单色化程度虽然比单色仪差，但与单色仪比较简单方便，成本低，光束张角大，面积大，所以透过率高。目前，一方面在光学仪器中采用干涉滤光获得单色光，如法布里—珀罗干涉仪器的预色散器，另一方面国外有用成组的干涉滤光片构成独立的单色仪或分光计，事实上。这种单色仪在吸收光谱（或比色）中是有前途的。

宽带的干涉滤光片，如冷镜，红外反射镜，紫外反射镜等作用也是不小的。红外光是热的，可见光是冷的，因此选择性地反射可见光，让红外光透过，这个就叫做冷镜。其实，它也是一种截止型的干涉滤光器，干涉冷镜比吸收玻璃好，因为前者几乎不吸收红外线。红外或紫外反射镜则名符其实，反射的是红外或紫外光，其它的光则通过。这种宽带的干涉滤光片都是多层的，是制造比较困难的干涉滤光片。据报道，最多已达三十多层。

## 二、光学膜系

减反射膜的发现促进了薄膜光学的早期发展。在薄膜光学领域中，减反射膜对技术光学有很大的影响。在现代光学薄膜生产中，减反射膜仍然超过其它所有类型的膜系。

在光学系统中，光每经过一次光学表面都有一部分因反射而受损失，其透射率总是低于100%。例如，未镀膜的冕玻璃零件的透射率只有92%，而火石玻璃竟低到85%。大多数仪器包含许多个串置的零件，若零件表面不镀减反射膜，则仪器的总透射率将很低。而且，零件各表面的反射光有一部分最后到达仪器的焦平面，会产生幻像或光晕，这就降低了像的对比度。特别是用在电影放映中的镜头，由于它包含十四个或更多的零件，若不镀减反射膜，则这些零件必将完全失效。

减反射膜可由简单的单层膜直至二十层以上的多层膜系构成，前者的折射率等于基片折射率的平方根，而光学厚度为 $\lambda/4$ ，能使某一波长的反射率实际为零，后者则在某一波段具有实际为零的反射率。在每一种特定的应用中，所用减反射膜的类型与多种因素有关，例如基片材料、波长区域、所需特性以及成本等。

在可见光区，最常用的基片材料是折射率约为1.52的冕玻璃。减反射膜分为低折射率基片的和高折射基片的两类，大体相应于可见光区和红外区。

玻璃三层抗反射膜在可见光谱范围内产生低的反射率。目前广泛采用的三层膜是：由四分之一波的膜层氧化铝( $Al_2O_3$ )，半波的膜层氧化锆( $ZrO_2$ )和四分之一波的膜层氟化镁( $MgF_2$ )组成，镀在玻璃基片上，折射率大约是1.5。

由于有了减反射膜技术，就使复杂的光学镜头（如电影和电视上用的大倍率连续变倍镜头）成为实际可用的，目前可见区减反射膜单面反射损失低达0.1—0.2%。

膜系的另一基本类型是折射率高低交替、各层厚度均为 $\lambda/4$ 的多层膜。这种膜系预先规定每层膜的厚度，使其正好是设计波长的 $1/4$ 倍数，从而计算出获得低反射率所必需的折射率值。在高折射率层内，反射光不因反射而发生任何相移；而在低折射率层

内，反射光的相移则为 $180^\circ$ 。由入射光经膜系的各相继界面反射而产生的各个分量，在前表面重现时其相位全都一样，因此。它们将发生相长干涉。这就是说，膜系的有效反射率可以达到很高（要求多高就有多高，只要增加膜系层数就可）。这是高反射膜的根本形式。此膜系的高反射带仅跨越有限的波段，此波段取决于高、低折射率之比。超出此波段时，反射率即突然降为一低值。由于有这一特性，所以常用 $\lambda/4$ 多层膜作为组建许多膜系类型的基本单元。 $\lambda/4$ 膜系可作为长波通滤光片、短波通滤光片、简单的高反射膜（例如激光反射镜）以及薄膜型法布里—珀罗干涉仪的反射镜。

用高低折射率相间的多膜层可以扩展减反射波段到全部可见波段，并进一步提高减反射率。这对于彩色电视摄影特别必要，因为必须使镜头兰色端及红色端都具有较高的透过率。先进的复杂镜头如彩色电视用的变焦距镜头具有三十多个空气面，在整个可见波段范围内镀多层膜可使透射率达85%以上。

采用这种膜系可以简化镀膜时对厚度控制的操作，但要求对折射率有很精确的控制。

多层高反射膜也是光学膜系的一种基本形式，它是一种新近发展的反射膜，即多层全介质膜。在重要类型的多光束干涉仪中，金属膜往往缺乏得到最佳结果所必需的特性（常用的镀铝膜的反射率在90%以下），而多层全介质膜能满足这种要求（镀介质膜可使反射率增至99%以上，目前激光高反射膜反射率可达99.99%），可使优质光学零件的多光束干涉仪得到最佳的性能，也是这种反射膜的最重要的用途。

用作多光束干涉仪（例如，法布里—珀罗干涉仪）的主要元件是干涉反射板，其结构是由两个高反射膜夹着厚度常为 $\lambda/2$ 的间隔层所组成。间隔层内的多光束干涉使得在某一狭窄波带上具有极高的透射率，间隔层

厚度正是该波带中心波长之半的整数倍。这种干涉滤光片在理论上具有任何的光谱特性。

特别有效的是高峰值窄带滤光片，半宽度可达1埃。常用的有带通滤光片，长、短波通滤光片，具有一定光谱分布的分色滤光片（例如彩色电视用的分色滤光片）、析光片、二色析光片等，利用类似于布鲁斯特角也可以做成高效率的偏振片。

此外，还有用于特殊需要的膜系，例如：

(1) 可变光密度盘。一个圆盘上，镀上膜层，在不同的角度，可使它透光密度按特定的要求而变。这种度盘可用于自动控制照相的曝光量。

(2) 波长渐变滤光片，旋转滤光片使光通过不同角度位置时得出不同波长的光。用以代替简单的单色仪，具有体积小等优点。

(3) 位相补偿片，放入光学系统的光瞳附近，用以校正残余像差。

(4) 相位滤波器，可以改变相位，用在信息处理中可以提高成像质量，解决像移问题。

现在，各种膜系滤光片的波长范围可以从红外到紫外，当然所用的材料应根据波段来选择。

设计减反射膜的最有效途径是用矢量法。为消除其固有的近似影响，一般是采用数字计算机进行精确校核。早期多层膜系的设计采用了直观原理，膜层厚度一般是1/4波长及其整数倍。现已发展到利用电子计算机进行自动设计。一般是在给定层数的情况下，在设计中调节各膜层厚度，使得到接近光谱要求的最佳设计，利用这种设计方法，也易于给出各个膜层的公差。

### 三、镀膜工艺

一批光学薄膜是在十九世纪初镀制成

的。当时所用的镀膜方法是对玻璃表面进行化学浸蚀或由溶液淀积。以后发展的镀膜技术是对铝进行阴极氧化，形成保护膜，或以液体膜料喷涂表面；有时膜料经高温火焰气化，或自身即行喷射。在十九世纪内还发现了溅射法，即在真空室内用离子轰击欲镀膜料，使其分子脱离，撞击基片并与之粘附成膜，这种方法特别适用于难熔膜料。近年来发展到了低温溅射和离子束的方法。现代光学薄膜的基本镀制技术是真空涂镀法。六十年代以来，随着激光技术的发展，还出现了用激光作为热源的镀膜新技术。

#### 1) 真空镀膜机

作真空镀膜用的装置，目前已经发展到了全自动快速真空蒸发装置，并且采用半导体集成电路，在硅片上蒸发铝电极。蒸发源采用的是电子束加热，代替了过去的电阻加热。从而，可以蒸发高熔点的材料，如 $\text{SiO}_2$ ， $\text{ZrO}_2$ ， $\text{Y}_2\text{O}_3\text{Al}_2\text{O}_3$ 等氧化物，以及合金和化合物等。现代的镀膜机在蒸发室和镀膜室之间装有自动闸板阀可互相隔离。因此每次打开钟罩时暴露大气部分减为最小，使抽空时间缩短。并防止了蒸发室的污染，使元件质量得到了提高。除装片和卸片外，全部过程都可自动操作，工作周期约为二十分钟。

采用电子束加热法，蒸发物质是放在合适的坩埚或导电材料的炉床内的，用电子束轰击使之加热蒸发。被加热的物质是在表面的中心，离开坩埚还有一个合理的传导长度，因此没有严重的热损耗。同时坩埚通常是水冷的，因而能避免蒸发物质和坩埚之间的反应，比电热法常用的冰晶石、 $\text{MgF}_2$ 、 $\text{ZnS}$ 具有优越得多的牢固性和化学稳定性，生产效率较高。

全自动镀膜机的真空系统，目前采用的有湿式和干式两种。前者以油扩散泵，后者则以溅射离子泵和钛升华泵作为主泵。这两种系统对于制造MOS电路的硅片蒸铝来说，对膜层的质量都没有什么影响。目前，湿

式真空系统采用的油扩散泵容量达到10吋，被抽容积和泵的抽速之比值达到了1:22。

全自动镀膜机采用了自公转的行星式夹具，使膜厚均匀度可达 $\pm 5\%$ 。电子枪使用磁偏转型的。

### 2) 激光蒸发

在真空蒸发方面，近来已迅速发展了激光蒸发和高频感应蒸发。激光蒸发镀膜就是将激光束作为热源来加热蒸发源的一种镀膜技术。这种技术已引起人们的普遍重视。其优点是：(1)热源在真空室外，不存在污染问题，(2)难熔金属和化合物均可蒸发；(3)对元件不含有电子和X射线的损伤。近几年来，国外多数是以 $\text{CO}_2$ 激光器镀制各种介质膜和半导体膜，还有用20W连续激光镀制铂膜。一九七三年有人用脉冲激光镀制进行元素分析的金属薄膜样品，也有人用激光来淀积光学材料 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{ZnS}$ 和 $\text{MgF}$ 。总的说来，激光镀膜虽进行了许多探索，但至今仍处于实验阶段。

### 3) 高频感应加热蒸发

关于高频感应加热蒸发，以前由于坩埚对蒸发材料的污染，几乎都已不用。最近找到了氮化硼坩埚解决了污染问题，又引起人们重视。其优点是：(1)蒸发源不会产生对元件的电子和X射线损伤；(2)蒸发速率大，一般是电枪的十倍；(3)膜厚均匀；(4)坩埚寿命长，一般可使用二十五至三十次。

## 2. 溅射技术

目前发展到了低温溅射和离子束溅射。所谓低温溅射，就是采用磁控管装置以减少电子轰击，从而降低基片的温升而实现的。其优点是：(1)没有电子轰击效应；(2)基片温度低，放气量少；(3)靶在中心，周围可以装很多基片。离子溅射就是一种把等离子体中的离子加速，聚焦并射到处于高真空中的靶而进行的溅射，它的优点是：(1)由于是在高真空 $15^{-5}$ — $10^{-7}$ 托下进行的，故气体污染少；(2)溅射粒子动能大，膜的粘着性提高；(3)二次电子对基片轰击所造成的

温升减少。

溅射技术在当前并非广泛应用的方法，将来情况怎样有待探讨。国外用溅射法已镀制了许多红外膜，以及金属和介质混合的膜层。

## 3. 离子蒸镀

蒸镀技术目前发展的一个值得注意的新动向是离子蒸镀。这是一种真空蒸发与溅射相结合的新工艺。其原理是象溅射那样，在蒸发源与基片之间建立起一个低压气体放电的等离子区。处于负1—5千伏高压的基片，由于被等离子包围，不断地受到等离子体中的离子轰击而蚀刻清洗。另外，从蒸发源汽化来的蒸气分子(金属、非金属)，由于等离子体中电子的作用变为离子，随着电场加速而被吸引到基片表面上，堆积而形成薄膜。

离子蒸镀技术，在国外一九六三年就有了报导，近年来开始盛行，各种离子蒸镀设备也相继出现，它是真空技术应用方面的一个新领域。

## 四、膜厚控制

早期的膜厚控制几乎是用眼睛作为检测器的，即根据薄膜在白光照射下所呈现的颜色来判定膜层的厚度。因此。在多数情况下只镀制简单的单层膜，比如单层增透膜。这类膜的特性是对层厚误差很不敏感。当增透膜对可见光而言达到正确的厚度时，则表面对白光的反射颜色呈现品红，原因是绿光的反射率被减小了。在这种场合，目测法是足以胜任的，故至今仍被广泛采用着。

在镀制其它类型的膜系时，目测法的误差就显得太大，因而必须采用别的膜厚监控方法。现在最常用的就是光电监控法。国外有一种叫奥格(Auger)电子光谱仪能显示多层膜厚度的大小。

在严格的光谱要求和增透效率或反射效率的情况下，提出了对膜层厚度的测试要严

格控制精度的要求。传统的有极值法，后来发展了波长扫描法、双色法等。波长扫描法精度可达到1—2%。双色法是在两个波长上测量控制片的反射率或透过率，并且显示它们的差值。这个方法比之于波长调制法有较大的灵活性，因为两个波长可以选在光谱中任何地方，其间隔可以很大。

溅射时膜厚的测量，主要是利用测量膜的电阻法，在仪器前加一个高频滤波器来测量金属膜的电阻值，从电阻值的大小来鉴别金属膜的厚度。

随着光学薄膜的广泛应用和薄膜自动设计的进展，越来越多地要求采用多层厚度均不相等而且不是四分之一波长整数倍的任意厚度，从而促进了任意控制技术的发展，出现了电离真空计和利用压电石英振荡频率随附着膜层质量而改变的用以控制膜厚的技术，并可采用数字化显示，可得到很好的重复性和精度。美国的DDC—1000型石英晶体膜厚控制仪，膜厚测量范围为0—999.9千埃。

## 五、薄膜材料

在薄膜生产中，用得最多的膜料是氟化镁，它在可见光内的折射率约为1.39，被广泛用来增透透镜。

所有膜料中最易蒸发的是硫化锌和冰晶石。在可见区内，它们的折射率之比差相当好：硫化锌的折射率约为2.35，冰晶石为1.35左右。由于它们容易蒸镀，所以也被广泛应用，特别是用于制造可见光和近红外区的多层滤光片上。

用二氧化铈作高折射率层，用氟化镁作低折射率层可以获得可见光区用的极为坚固的膜层。高功率激光器要求反射率高而损耗低，一般也是采用二氧化铈来镀制这种高的反射膜。高熔点(1925℃)的二氧化钛也是极其强固的膜料。它在整个可见光区能保持透明，在紫外区的350毫米附近，吸收变得

很强。

$\text{Si}_2\text{O}_3$ 膜具有紫外的辐射效应，是保护铝反射镜的特别有效的膜料。

稀土元素的氧化物和氟化物也是良好的膜料，例如，用钨舟蒸发氟化铈时，可形成很稳定的膜。它在波长550毫微米处的折射率为1.63。用钨舟蒸发镧。镨和钇的气化物以及氟化物，也能形成极为良好的膜。

在红外区可以有更多的实用膜料。最常用的半导体硅和锗，它们的本征限波长分别为1.1微米和1.65微米，很适用于红外区。硫化锌和一氧化硅是红外区最常用的低折射率膜料。一系列的氟化物(如氟化钙和氟化钡)和氧化物(如二氧化铈和二氧化钛)也是低折射率的红外膜料。

目前在镀制均匀膜和周密设计的非均匀膜时，还注意到了混合膜料，例如，用二氧化铈与氟化镁、硫化锌与冰晶石、锗与氟化镁相混合以及氧化锆( $\text{ZrO}_2$ )和钛酸锆( $\text{ZrTiO}_4$ )混合的最新材料等等。由于混合物蒸发容易进行氧化锆和钛酸锆混合物是从重钨舟蒸发出来的，其蒸发温度是2400℃，并且用这种方法可以制得范围很宽的实用折射率值，故混合法显得具有广阔的前景。

三防膜层还可采用蒸镀氟醛和聚四氟乙烯后再涂上有机硅油。

化学镀膜常用的材料是硅酸乙酯(低折射率)和钛酸乙酯(高折射率)。

制作蒸发膜时，要选择符合要求的蒸发物质实际上是比较困难的。由于非常牢固的膜层，其结构往往容易受蒸发条件的影响而使性能不稳定，故一般必须用高精度控制其特性。要以极耐久性(耐机械性、耐湿性)好的蒸发膜来制作薄膜部件，往往是很困难的。使用不同的膜料，除了注意膜层的牢固性和化学稳定性外，对于要求严格的膜系(例如用于激光腔内的膜片)还需要注意膜层的散射和吸收。为此，除光学测试外，需用电子显微镜对膜层结构进行研究。

(下转53页)

# 扩大 A—6E 性能的目标瞄准传感器

格鲁马公司将为美国海军飞行中队提供一大批改进式的A—6E,在这种战斗机的机身下部装有目标识别的传感器。

这种传感器可在全天候的条件下进行工作。它有一个大的转搭式的窗口,直径为20

吋,供红外监视用;还有两个小的窗口,一个是激光接受器,另一个则是激光测距仪。

摘自“Aviation Week and Space  
Technology”Vol. 106, №5  
P91, 1977

# 1 米<sup>2</sup> 的太阳能相当于60公斤的石油

太阳光(能)是人类贮存量最大、能量最多的一个宝库。

在太阳能的利用方面,意大利则是一个先进的国家之一。意大利安塞尔公司目前正为美国“GIT”公司输出一套组合式的太阳能

发电装置。

有人计算,以一年为期限,一平方米的太阳能,就节约60公斤的石油。

摘自日本“光学技术通讯”154卷  
№11, 76, P54

(上接17页)

最近新发展的光学薄膜材料还有采用电子束蒸发的氧化锆和氧化铪等。新材料镀制的膜层光学均匀性较好,折射率在500nm是2.15。

## 六、关于发展方向问题

光学镀膜技术的发展方向目前看来,主要在两个方面。首先在于完善那种说明镀层性质的模型概念。未来需要造出一种仪器来测量光学薄膜的统计性能。例如,薄膜的异变(Variance)和自互异变(Autocovariance)等。其次是关于膜料的问题。问题在于探讨

理想的材料:机械性能好。光吸收和散射低,其折射率从蒸发到再蒸发都要求可再现。要找到这样的材料是不容易的,因为许多材料需要满足膜层的折射率范围。目前有些干涉膜层能在波长110nm下工作,有些技术能使多层反射镜的波长短至10nm。

在镀膜和集成光学及平面光学波导技术的发展之间也许能出现一种模拟。六十年代后期,有许多文章是强调这类仪器的物理光学性质,以后很快出现了耦合器和传播理论。后来,中心的议题是关于寻找波导的材料。当前继续在探讨高效率、低损耗的无机平面波导管。