

硬质玻璃基底上三层宽带高增透光学薄膜的制备

〔齐钰、姜贞子〕

〔摘要〕 描述了硬质玻璃基底上三层增透膜的原理，介绍了薄膜的制备工艺及其特性。对中间层 ZrO_2 材料的非均匀性及其对整个膜系增透效果的影响和改进方法加以讨论并给出了有关的参考数据。

一、引言

增透膜亦称减反膜，是光学仪器上具有普遍实用价值和应用最多、最广的一种光学薄膜。其主要作用在于提高光学系统的透过能量和改善成像质量，同时保护光学元件表面，延长仪器使用寿命。

近年来，随着遥感技术、彩色电视电影技术等各方面的发展，对各类光学仪器的性能提出了更高的要求。其中成像质量和自然彩色还原特性均成为评价光学系统的重要方面。这就要以优质的消色差增透膜代替通常所用的单层、双层增透膜，用以克服光学系统透过光的“着色”缺欠。据报导，英国的Varotal产品，由于采用了镀膜的新技术，已使每个玻璃—空气界面的剩余反射在420—720毫微米光谱范围小于0.5%，使整个具有20片玻璃的彩色电视变焦距系统总透过率达80%以上^[1]。

硬质玻璃（折射率为1.47~1.60）基底上的氧化铝—氧化锆—氟化镁三层宽带高增透光学薄膜满足了彩色电视摄像机光学系统的设计和使用要求，并成批量应用到同类产品的光学部件上，获得较好的效果。通过五年的科研生产实践证明，这种三层宽带增透膜的光学性能、机械性能和化学稳定性均优于单、双层膜，已成为目前比较优质的消色差增透膜。

二、膜系的选择及增透机理

1. 膜系的选择

早期多层增透膜的制备仅限于 $\frac{1}{4}$ 波长堆的三层膜，材料以 TiO_2 和 SiO_2 为主，成功的在可见光谱区将玻璃表面的反射率降低到1%以下^[2]。近年来由于电子计算机和新的薄膜制备技术的引进，使得等效组合膜^[3]和任意厚度的宽带增透膜^{[4][5]}得到实际应用。但目前由于制备工艺上的种种困难，尚不能广泛采用。

为提高膜层的牢固性，减少膜层的吸收、散射和角度效应，并考虑到制备工艺上的方便，在满足膜层光学性能条件下应力求膜层薄、层数少，因此选择 $G \frac{1}{4}\lambda - \frac{1}{2}\lambda - \frac{1}{4}\lambda A$ 三层膜系较适宜。

有关性能良好的多层增透膜理论很早就有文献发表，并且Cox、Hass和Thelen等人对 $G \frac{1}{4}\lambda - \frac{1}{2}\lambda - \frac{1}{4}\lambda A$ 膜系的各种分析已做了详细的描述^[6]。该膜系在理论上可取得可见区300m μ 光谱范围内小于0.5%的剩余反射。指出，膜系各层折射率的匹配要满足 $n_1^2 n_3 = n_2^2 n_0$ ，可在 λ_0 处取得零反射； λ_0 处反射与 n_2 的大小无关，但整个膜层分光特性曲线的形状却与 n_2 的大小有较大的关系。

特性分析表明,对折射率为1.52的基底,一般取氟化镁($n=1.38$)为外层时,内层折射率 $n_3=1.70$ 或稍低,中间层的折射率 $n_2=2.0\sim 2.2$ 均能取得较好的增透效果。

膜层材料的选择在着眼于折射率匹配和牢固性的同时,必须考虑到膜层在可见区的低吸收和高透过(特别是短波的高透过)。

根据上述,我们选取 Al_2O_3 、 ZrO_2 和 MgF_2 三种膜层材料。它们共同的特点是从紫外到近红外光谱区均高透明、低吸收,并且有良好的机械性能和化学稳定性。其中 Al_2O_3 和 ZrO_2 属于高温氧化物,和基底有较强的结合能力,机械性能和抗腐蚀能力极强,因此其组合膜层有很大的使用价值。三种膜层材料的特性列入〔表1〕。

〔表1〕三种材料特性

	折 射 率	透 明 区	熔 点	物 理 化 学 性 能	蒸 发 方 式
Al_2O_3	1.56—1.65*	0.23~2 μ	2050 $^{\circ}C$	机械性能良好稍溶于酸	电子束
ZrO_2	2.0—2.1*	>0.34 μ	2700 $^{\circ}C$	机械性能优良稍溶于强碱	电子束
MgF_2	1.38	0.15~10 μ	1395 $^{\circ}C$	机械性能优良烤后耐水、酸	Mo舟热蒸

* 折射率随蒸发条件变化

我们在制备工艺中三种材料的折射率约为

$$n_{Al_2O_3} = 1.63, \quad n_{ZrO_2} = 2.0,$$

$$n_{MgF_2} = 1.39.$$

2. 增透机理

根据光的干涉原理,当一束光经过二种透明介质界面时,分成透射和反射二光束,其反射光的振幅强度由费涅尔公式给出:

$$r = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}$$

$$\text{反射率 } R = r^2 = \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2$$

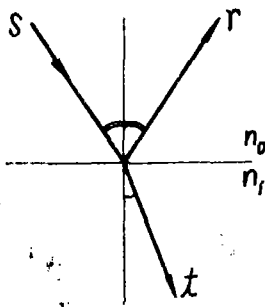


图1 单一界面光的反射

如〔图2〕所示光在单层膜二个界面上的反射,在光垂直入射(忽略光在膜层中的吸收和多次反射)的情况下,可归结为求两束反射光合成振幅强度。当 r_1 和 r_2 振幅强度相等,位相相反时,合振幅为零;当 r_1 和 r_2 不等,其合振幅取决于 r_1 和 r_2 的位相差。

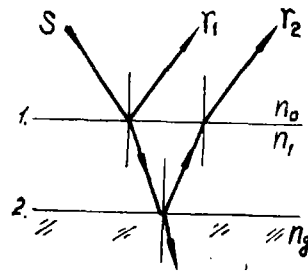


图2 二个界面上光的反射

同理,如〔图3〕所示的三层膜结构,其增透机理同样归结为求四个界面各反射光的合振幅。并且要达到增透目的,界面上四束反射光的位相必须有相反。下面我们具体分析各束反射光的情况:

所用膜系 $GH'HLA$ 满足

$$n_1^2 n_3 = n_2^2 n_0,$$

$$n_1 d_1 = n_3 d_3 = \frac{1}{4} \lambda_0,$$

$$n_2 d_2 = \frac{1}{2} \lambda_0,$$

$$n_0 < n_1 < n_3 < n_2, n_1 < n_4 < n_3.$$

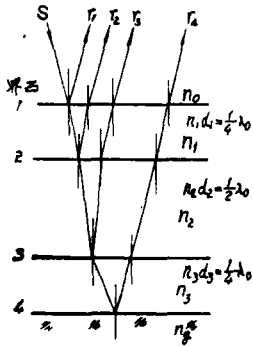


图3 三层增透膜结构光的反射

我们知道，光在界面上的反射有位相变化。其变化取决于界面二侧的介质和光在介质中的行程。当光束由“光疏”介质入射到“光密”介质和光束在介质中有“半波损失”时，其反射光位相均跃变为 π 。

因此对三层膜来说，入射光S入射到界面1，因 $n_0 < n_1$ ，光是由“光疏”到“光密”，故反射光 r_1 位相跃变 π 。

光束S入射到界面2，因 $n_1 < n_2$ ，同样是“光疏”到“光密”，故反射光 r_2 位相亦跃变 π 。但是 r_2 在介质 n_1 中比 r_1 多走 $\frac{1}{2} \lambda_0$ 光程，由位相公式可得 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot nd = \pi$ ，即 r_2 与 r_1 的位相差为 π 。故位相相反。

光束S入射到界面3，因 $n_2 > n_1$ ，光是由“光密”到“光疏”，反射光位相无跃变。

但由于 r_3 比 r_1 多走了 $\frac{3}{2} \lambda_0$ 光程，引起 3π 的位相变化，故 r_3 与 r_1 的位相差为 2π ，位相相同。

同理，界面4反射光位相不变，又因 r_4 比 r_1 多走 $2\lambda_0$ 光程，引起 4π 的位相变化，故 r_4 与 r_1 位相差为 3π ，位相相反。

由上述分析可知：反射光束 r_1 与 r_2 和 r_4 同位相，与 r_3 位相相反，构成了四束相干光相抵消的第一个条件。

下面再用矢量法简单计算各反射光束的

合振幅强度。

由费涅尔公式 $r = \frac{n_i - n_j}{n_i + n_j}$ 和给定的参

数 $n_1 = 1.39$ $n_2 = 2.0$, $n_3 = 1.63$, $n_4 = 1.52$, $n_0 = 1$,

$$\text{有 } r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} = \frac{1 - 1.39}{1 + 1.39} \doteq -0.163,$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} = \frac{1.39 - 2.0}{1.39 + 2.0} \doteq -0.179,$$

$$r_3 = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} = \frac{2.0 - 1.63}{2.0 + 1.63} \doteq 0.102,$$

$$r_4 = \frac{n_3 - n_4}{n_3 + n_4} = \frac{1.63 - 1.52}{1.63 + 1.52} \doteq 0.035$$

所以在 λ_0 处反射光束的合振幅为：

$$r = |r_1| + |r_3| - |r_2| - |r_4| = 0.051,$$

其反射能量： $R = r^2 = 0.0026 = 0.26\%$

同理可由公式 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} nd$ 计算出可见区

任一波长处的位相厚度，再用矢量法求其合振幅，计算其反射率，即可得全波段的剩余反射。

为精确求得在可见区的剩余反射，在给定的参数下，用电子计算机计算了三层膜的特性，其结果如〔图4〕曲线a所示。

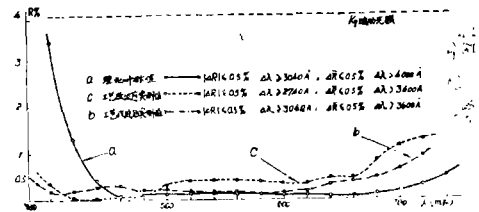


图4 三层膜理论计算光谱特性同制备工艺改进前、后的实测低反曲线比较

三、制备工艺

1. 设 备

采用兰州曙光 MDD—450 高真空镀膜机、经自行改装成长焦距直射式电子枪设备。膜厚控制采用300c/s放大器极值法；比较片置于托盘中心，略高于试件，反射光控

制，入射光成7度角，其结构如〔图5〕所示。

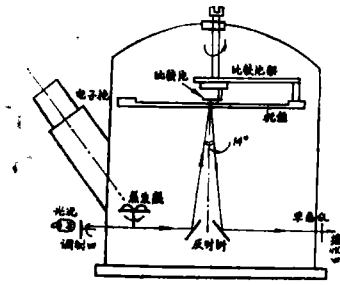


图5 真空室结构示意图

为提高控制精度，特别是要控制准对三层膜分光特性曲线影响最大的 MgF_2 层的膜厚，我们选用二个比较片来完成，其中一片控制内层(Al_2O_3)和外层(MgF_2)，另一片控制中间层(ZrO_2)。

比较片为背面磨毛 12×24 长方形，分二次使用，涂膜时不随试件转动，并采用“燕尾槽平动式”机构，以保证更换比较片时光束入射角不变，复位重复性好。结构示意于〔图6〕。

2. 蒸发材料的处理

三种材料均为光谱纯度。使用前均需热

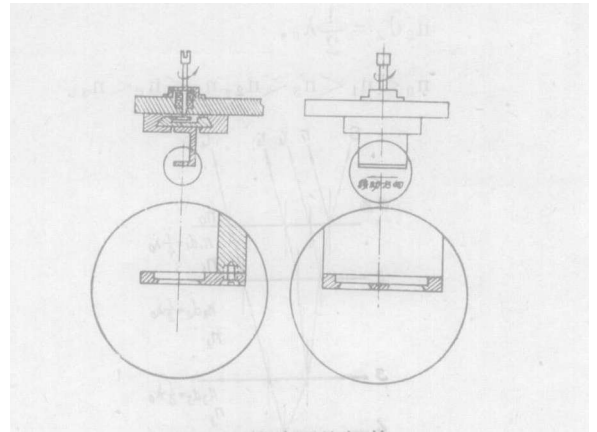


图6 比较片更换机构

处理。方法是：

1) 将粉末状的 Al_2O_3 和 ZrO_2 在大气中 $900^\circ C$ 温度和 $3 \text{ 吨}/\text{cm}^2$ 压力下热压成 $\phi 50\text{mm}$ 厚 5mm 块状。

2) 将粉末状的 MgF_2 在 $1250^\circ C$ 高温炉中和 2×10^{-3} 托真空下烧结成结晶状。

经处理后的材料结构紧密，清除了低温杂质，蒸发时放气量小并可防止飞溅现象。

3. 蒸发参数

三种膜层材料的蒸发参数见〔表II〕所示(典型实验记录)。

(表I) 典型蒸发参数(改进工艺后)

蒸发材料	指示器数值	电子枪束流	真空度	蒸发速率	蒸发时间
Al_2O_3	49—85	60mA	$4-6 \times 10^{-5}$ 托	60—70HZ/2C	1'20"
ZrO_2	27—100—22	90mA	$4-8 \times 10^{-5}$ 托	50—60HZ/2C	2'55"
MgF_2	92—16, 100—4	20mA	$1-2 \times 10^{-5}$ 托	60—70HZ/2C	1'05"

基底温度 $240^\circ C$

四、实验结果

1. 光学特性

在可见光谱区完好的三层宽带增透膜对正入射光的反射呈“暗绿色”。

将 $\phi 30 \times 3\text{mm}$ K_9 试片双面镀三层膜后用苏联 $C\phi-10$ 自动光谱仪实测其透过光

谱曲线，结果见〔图7〕。〔图8〕为 K_9 玻璃上单面三层膜同单层 MgF_2 膜在光学特性上的比较。以此曲线为依据计算其剩余反射和带宽，结果列入〔表III〕。

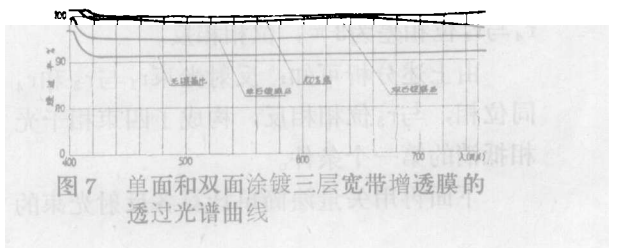


图7 单面和双面涂镀三层宽带增透膜的透过光谱曲线

过曲线未见变化。

经“盐雾环境实验室”在海水温度39℃、相对湿度95%条件下喷雾实验七昼夜膜层未见变化。

4. 热稳定性

经烤箱加热200℃持续8小时后，取出自然冷却，膜层亦未见变化。

经“湿热环境实验室”在相对湿度85~95%和+45~+30℃的交变温度下七昼夜，膜层基本无变化。

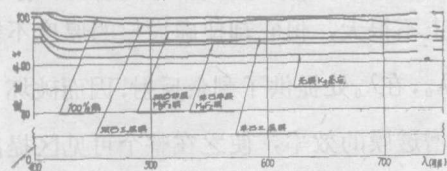


图8 三层宽带增高透膜同单层MgF₂增透膜的光谱透过率比较

〔表Ⅲ〕 试片透射光谱曲线结果

双面平均透过率	单面平均 剩余反射	增透带宽
$\bar{T}=99\%$	$\Delta R=0.5\%$	0.42~0.72μ $\Delta\lambda=3000$ 埃

用K₉楔形板实测涂三层膜后的光谱剩余反射，其结果见〔图4〕中曲线b。低反测量表明，单面平均剩余反射≤0.5%可达带宽3600Å以上，其剩余反射曲线呈典型“W”型，同理论计算结果基本一致，并且同Cox给出的CeF₃-ZrO₂-MgF₂典型曲线极为接近（或比其见好些）。

该膜层在30°入射角以内使用其角度效应不显著，可保证良好的光学性能。

2. 机械牢固性能

三层膜经得起常规牢固性检查，用力擦拭后不出现道印。其牢固性优于K₉基片上的单层MgF₂膜。机械强度试验比较见〔表IV〕。

〔表IV〕

膜层种类	反射光出亮道子时	膜层破裂时
三层增透膜	约400转	约1000转
K ₉ +MgF ₂	约300转	约800转
ZF ₆ +MgF ₂	约100转	约120转
SiO ₂ -ZrO ₂ 四层膜	约800转	约1200转

※ 数据由MC-1型膜层机械强度试验仪检测
磨擦条件：500转/分，加强砝码200克，

3. 化学稳定性

经自然时效28个月后膜层未见变化，透

五、讨 论

该膜层适用于折射率为1.47到1.60范围的玻璃增透，其透过曲线见图11和12。

众所周知，基底温度、真气压强和蒸发速率是影响膜层的光学性质和力学结构的最重要因素。由于氧化物膜层的性质一般都不同程度的依赖于淀积条件，因此，能否制备出理想的膜层，很重要的是能否控制适当和稳定的制备条件，使其淀积成膜的结构稳定，折射率匹配，牢固性好。

1977年我们在工艺上对上述三方面做了改进，其体会如下：

1. 最佳基底温度的选择。

Al₂O₃和ZrO₂二种薄膜材料的光学特性对基底温度有较强的依赖关系，其折射率均随基底温度的升高而增大。ZrO₂薄膜尤为明显。（表V）列出了具体的实验数据。

〔表V〕 折射率与基底温度的依赖关系

材料	基底温度			
	室温	140℃	260℃	300℃
氧化铝(Al ₂ O ₃)	1.55	1.62	1.64	1.66
氧化锆(ZrO ₂)	1.85	1.92	1.96~2.0	>2.0

$P 8 \times 10^{-5}$ 毛

表中折射率均由试片的光谱透过曲线按

公式 $n^2 = n_0 n_g \frac{1 + \sqrt{R_r}}{1 - \sqrt{R_r}}$ 计算所得 ($\lambda = 0.5\mu$)，

由于膜层填充密度低，在大气中吸附水汽，致使计算值比实际值略高。以下皆同。

由〔表V〕可见，在300℃基底上淀积的膜层折射率比较接近三层膜的消反射条件。但是考虑到制备工艺上的方便，还是以260℃的基底温度适宜。

2. ZrO₂膜层的非均匀性影响及其补偿途径

在淀积过程中，ZrO₂膜层的折射率随着膜厚的增加发生改变，显示出非均匀效应^{[7][8]}。其非均匀性强烈的依赖于基底温度。当基底加热到250~300℃时，膜层折射率随膜厚的增加而减小，表现为负非均匀效应；当基底不加热时，膜层折射率正相反，表现为正非均匀性效应^[9]。

在三层膜制备中ZrO₂的负非均匀效应表现在比较片上涂镀 $\frac{1}{2}\lambda_0$ 厚ZrO₂膜后的反射率总是低于镀前的初始值。还发现涂镀 $\frac{3}{4}\lambda_0$ 膜后的反射率也总是低于 $\frac{1}{4}\lambda_0$ 层的反射率，而且其趋势较前者明显。如实验中指示器表头走向为“22—84—20—76”。

实验表明，在相同制备条件下所制备的 $\frac{1}{4}\lambda_0$ 厚度同 $\frac{3}{4}\lambda_0$ 厚度ZrO₂膜的折射率相差近2%，实测得折射率分别为 $n_{\frac{1}{4}\lambda_0} = 1.95$ 和 $n_{\frac{3}{4}\lambda_0} = 1.91$ 。其函数关系示意〔图9〕。

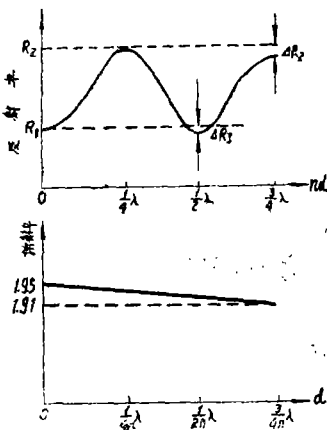


图9 ZrO₂膜的负非均匀效应

ZrO₂膜的负非均匀效应虽然在折射率变化上不很大，但它却使虚设层的厚度不等于 $\frac{1}{2}\lambda_0$ ，在 λ_0 处提供了剩余反射，因而破坏了三层增透膜的效率，使之在整个可见区提高了反射。〔图10〕中曲线b表明了ZrO₂膜折射率的减小对三层膜的影响。曲线a中的ZrO₂为均匀层。

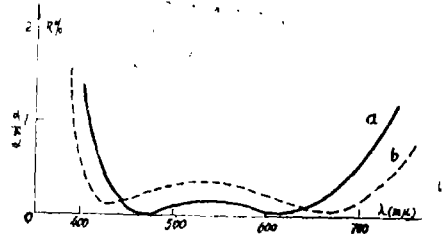


图10 计算的三层膜中 $\frac{1}{2}\lambda$ 层折射率减小的影响

a: $\frac{1}{2}\lambda$ 为均匀层 $n = 2.1, n_s = 1.63$.

$n_1 = 1.38$

b: $\frac{1}{2}\lambda$ 为非均匀层

对于ZrO₂这种负非均匀性影响的补偿方法大致有三种。一种方法是提高内层折射率的办法补偿，Vesmeulen提出折射率的范围在1.67~1.75，木村信义建议采用MgO·Al₂O₃材料($n = 1.72$)代替Al₂O₃。另一种方法是使用新材料消除单纯ZrO₂的非均匀性。Elmar Ritter^[10]建议使用ZrO₂和ZrTiO₄的固熔体代替ZrO₂。再一种方法是利用ZrO₂本身的负非均匀性，在蒸涂中改变蒸发条件加剧这一效应，使ZrO₂膜折射率由2.05“渐变”降低到1.90，成为梯度膜，从而改善三层膜的特性。

比较上述三种补偿方法哪一种最为有效则需通过实验验证。我们认为采用ZrO₂和ZrTiO₄的固熔体代替ZrO₂的办法应该是有效的。目前我们已制备出ZrTiO₄薄膜，折射率在 0.5μ 为2.20以上，膜层较均匀、无吸收，机械牢固性极好，可做为一种新的高折射率材料。对ZrO₂和ZrTiO₄的固熔体正在配

制, 深入的工作有待进一步实验。有关利用 ZrO_2 本身的负非均匀性实现“梯度膜”的作用, 通过理论计算和初步实验的结果表明, 在现有工艺基础上实现“梯度膜”对三层膜光学特性可以增加带宽 200 \AA , 但整个区间的剩余反射均有增大, 因此未见到明显的改善效果。

3. 稳定蒸发速率, 实现高真空下快速蒸发。

实验结果表明, Al_2O_3 和 ZrO_2 薄膜的光学特性对真空压强和蒸发速率都有较大依赖关系, 其中仍以 ZrO_2 为显著。〔表VI〕给出基底温度为 260°C 时, ZrO_2 淀积膜层折射率与压强和速率的关系。

〔表VI〕 ZrO_2 膜折射率与压强、速率关系

淀积条件	$P=9 \times 10^{-7}$ 托	氧压下 (充 O_2 , $P=1 \times 10^{-4}$ 托)	渐变氧压下 (充 O_2 , $P=1 \times 10^{-5} \rightarrow 1 \times 10^{-4}$ 托)	高真空快速蒸发 $P=2 \times 10^{-5}$ 托
折射率	1.95	1.95	1.91	>2.0

基底温度 260°C

Al_2O_3 膜层折射率受真空压强和蒸发速率影响变化不大, 其差异均在 1% 左右。

实验还表明真空度在 1×10^{-4} 托以上的变化差异对膜层光学特性的影响较小, 而且这个影响要比蒸发速率的变化造成的影响要小。

因此, 为提高膜层的牢固性和改善光学特性必须适当的提高真空度和蒸发速率, 力求在高真空中稳定的速率下实现快速蒸发。

〔表VII〕给出制备工艺改进前的一组蒸发参数, 其膜层的低反射测量结果如〔图4〕中

〔表VII〕 改进工艺前的蒸发参数

类别	指示器格数	加速高压	速流	蒸发时间	真空度	速率
材料						
Al_2O_3	40-65	7kV	40mA	3~4'	5×10^{-5} 托	不等
ZrO_2	25-82 -23	8kV	55mA	10~12'	5×10^{-5} 托	不等
MgF_2	100-30 90-3	3kV	10mA	1~2'	2×10^{-5} 托	不等

基底温度 150°C

曲线 c 所示。比较曲线 b 和 c, 可见改进工艺后的效果。

六、结 论

按上述工艺制备的硬质玻璃基底上 $Al_2O_3 - ZrO_2 - MgF_2$ 三层宽带高增透膜是目前比较优质的消色差增透膜。它具有光性好、机械强度高, 化学稳定性强的特点, 适用于可见和近红外区的各类光学仪器, 尤其适合于彩色电视摄像机一类对成象质量和彩色还原性能要求较高的光学系统。

三层膜的制备需用电子束镀膜设备, 虽然操作稍微复杂, 但其工艺稳定, 重复性好, 完全适合于各单位批量生产。

七、结束语

由于条件所限, 我们对三层膜只做了一些初步的工作, 尚未能从膜层结构等方面做深入的了解, 这有待于今后努力。相信, 随着薄膜事业的发展, 会很快获得完善和进展。

最后需说明, 邵桂英和常金和同志曾一起参加了三层膜的初期试制工作。

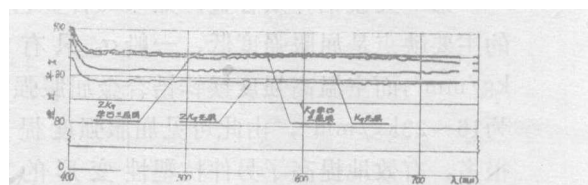


图11 同次实验制备的 ZK_0 ($n=1.62$) 和 K_0 ($n=1.52$) 玻璃基底上的三层宽带增透膜透过曲线比较

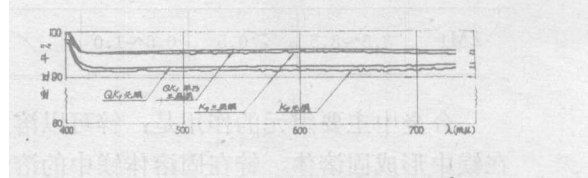


图12 同次实验制备的 QK_1 ($n=1.47$) 和 K_0 ($n=1.52$) 玻璃基底上的三层宽带增透膜透过曲线比较

前其中采用理论折射率的设计比较,波差是相当大。在435.8和546.1nm波长附近稍微超出 $\lambda/4$ 判断,只是在625和905nm之间的各个波长波差小于 $\lambda/10$ 。

图14表示空间频率10、30和50对线/mm依波长为函数的MTF变化。高级波差的影响在波长435.8和546.1nm附近最显著,但是10对线/mm物镜的MTF值仍然几乎等于只受衍射限制的MTF。幸而绝大多数情况下准直物镜只用于0到10对线/mm的频率范围。

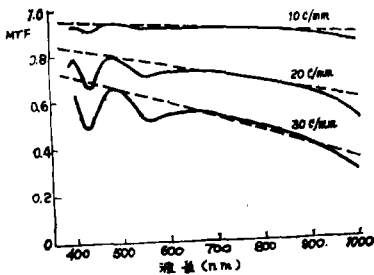


图14 PK₅₀/KZFSN₆/SF₆准直物镜用熔炼折射率的依波长为函数的轴上MTF曲线。

结 论

已经给出的复消色差准直物镜的参数适用于大相对孔径物镜在一个宽光谱范围内的MTF评价。这个最后设计的焦距是1471mm,可用口径136mm,由于现有玻璃光学特性的变化,实际设计比最佳化的理论设计的性能低得多。但是在波长400和1000nm之间,性能仍然是只受衍射限制的理想情况,在这个光谱范围内,以主波长焦点为准,焦点的偏离量小于0.0001EFL。这个准直物镜的制造现在仍在进行中。

我们并不认为这个准直物镜的性能已经达到了所能具有的最佳性能。不论何时设计者都必须记住费用和制造上的实际困难。也许采用某些进口玻璃会使校正得到改善。假如某几个面不必使用现有的样板半径,性能也可能得到改善。熔炼的玻璃与目录上的玻璃如果参数精确吻合,显然也能提高最后的性能,但是正如所指出的,这可能使费用大量增加。

译自“Optik”48(1977)491—506
〔冯秀恒译 蒋筑英校〕

上接15页

参 考 资 料

- 〔1〕王大衍著,彩色电视中的色度学问题,48,1973.
- 〔2〕L.郝兰著,林树加译,真空镀膜技术,159,19
- 〔3〕A.J.Vermuen, Optica Acta Vol. 18, 531, 1971.
- 〔4〕H.A.麦克劳德著,周九令、尹树伯译,光学薄膜技术,71,1974.
- 〔5〕U.S.P., 3712711, Vol.906, No.4, 1371, 1973,
- 〔6〕J.Cox, and G. Hass, Physics of Thin Films, Vol.2, 265, 1964.
- 〔7〕F.Stetter, R. Esselfom, Applied Optics, Vol.10, No.10, 1961, 1975.
- 〔8〕木村作义, 光学技术, ユンタクト, Vol.5, No.6.19, 1967.
- 〔9〕A.J. Vermuen, Optica Acta, Vol. 23, No.1, 71, 1976.
- 〔10〕Elrmar Ritter, Applied Optics Vol.15, No.10, 2315, 1976.