

$$\sigma = \frac{\Delta P}{P} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 + \left[\frac{\Delta\left(\frac{dE}{dT}\right)}{\left(\frac{dE}{dT}\right)}\right]^2 + \left(\frac{\Delta P_{\text{修正}}}{P_{\text{修正}}}\right)^2}$$

$$= \pm \sqrt{(0.3\%)^2 + (0.7\%)^2 + (0.5\%)^2 + (0.5\%)^2} \approx \pm 1\%$$

取极限误差  $\Delta = 3\sigma$

则  $\Delta = \pm 3\%$

也就是说我们的流水功率计的不可靠性

在  $\pm 3\%$  以内。我们用它与标准绝对辐射计的数次比对以及与标准中功率计的比对也都符合在这一范围,因而也证实了这一结论。

## 金属膜滤光片反射相移的自动补偿

尹 树 百

### 提 要

本文研究了制备滤光片的简捷控制方法——直接法的应用范围,指出它不仅适用于介质膜系,也适用于吸收膜(金属膜)系。从实验上已证实<sup>[1]</sup>,用此法控制膜厚,可使金属膜与介质膜之间的界面反射相移自行补偿,从而提高了滤光片的主峰波长定位精度。

### 一、引 言

窄带干涉滤光片的镀制,是光学薄膜技术中较困难的课题。其中心问题是透射主峰波长的精确定位,即要求所镀滤光片的最大透射率(主峰)准确地重复出现在预期波长处。因此,必须精确控制膜层的光学常数( $n$ )及其厚度( $t$ )。为了提高每层膜的控制精度,曾提出了光电极值法、波长扫描法、双色法、分光曲线比较法、晶体频移法等等。直接控制法是对滤光片本身直接进行膜厚控制(不用间测监控片),此时相邻各层膜的厚度必然相关,其厚度误差能相互自行补偿。对于全介质膜系而言,采用直接法,即使每层膜厚度用控制精度不太高的极值法进行控制,亦能得到主峰定位精度很高的滤光片。这一

点已为许多作者<sup>[7,8]</sup>从理论与实验上加以证实。

然而,对于介质膜系适用的直接控制法能否推广用来控制金属膜(有强吸收)滤光片?在制备紫外金属膜滤光片时,我们作了尝试<sup>[1]</sup>,取得了预期的效果,此方法不但简便易行,而且提高了主峰波长的定位精度。

对于金属膜滤光片的制造,通用的方法<sup>[2~5]</sup>是每层膜均单独用一块新的监控片进行厚度控制(间接法)。这样给制造上带来很多麻烦,不但要有间测片的换片机构,而且由于金属膜与间隔层分界面的反射相移(与全介质膜系不同),既不为零,也不为  $\pi$ ; 而是  $0 \sim \pi$  中间的某一值。从而使间隔层厚度的确定发生困难,因为反射相移的影响,其值不再简单地  $\frac{\lambda_0}{2}$  的整数倍,  $\lambda_0$  为滤光片主峰

波长。此外,作间接测量用的监控片与工件(滤光片本身)的相互位置,必须精确固定,否则也会引起膜厚误差。更主要的是在新鲜监控片上与在已有镀层的工件上,继后的膜层的凝结状态是大不相同的,从而带来很难修正的膜厚误差。事实上,在真空镀膜过程中,膜层凝结状态与许多因素有关,而这些因素却又很难控制到每次均重复一致。

采用作者提出的方法<sup>[1]</sup>,对滤光片的每层膜自始至终直接进行控制,则可以不必考虑所用膜料的光学常数随蒸发条件的变化,而间隔层厚度会与金属膜界面的反射相移自行得到补偿,从而(与间接控制法比较)提高了滤光片主峰波长的定位精度。

## 二、方法分析

根据滤光片的透射率公式:

$$\tau = \frac{T_1 T_2}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2} \cdot \frac{1}{1 + F \sin^2 \frac{1}{2} Y} \quad (1)$$

不难求出透射率极值  $\tau_{\max}$  与  $\tau_{\min}$ 。式中  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  分别为金属反射膜  $M_1$  与  $M_2$  的透射率和反射率(见图1)。

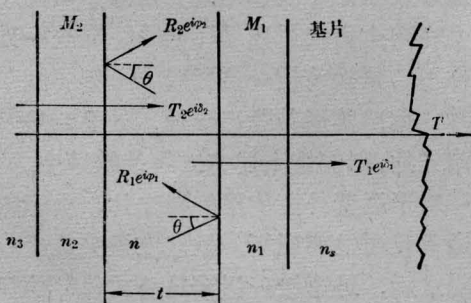


图1 滤光片的剖面示意图

$$F = 4(R_1 R_2)^{1/2} / [1 - (R_1 R_2)^{1/2}]^2$$

$$Y = 2\psi - (\phi_1 + \phi_2) + (\delta_1 + \delta_2) \quad (2)$$

其中  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  与  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  分别为  $M_1$  与  $M_2$  的反射相移和透射相移(在一级近似下,可忽略透射相移的影响);  $\psi = 2\pi/\lambda \cdot nt \cos \theta$  为间隔层的相位厚度。在垂直入射下,  $\cos \theta = 1$ , 这并不失去普遍性。

不难看出,当  $Y$  为零或  $2\pi$  的整数倍时,便得到滤光片的透射率极大值,即当

$$Y = 2\psi - (\phi_1 + \phi_2) + (\delta_1 + \delta_2) = 2m\pi \quad (3)$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

时,便得

$$\tau_{\max} = \frac{T_1 T_2}{[1 - (R_1 R_2)^{1/2}]^2} \quad (4)$$

由公式(3)还可求出,  $m$  干涉级次的主峰波长  $\lambda^{(m)}$

$$\lambda^{(m)} = \frac{2nt}{m + (\phi_1 + \phi_2)/2\pi} \quad (5)$$

此外也求得通带半宽度  $\omega_{0.5}$ :

$$\omega_{0.5} = \frac{(1-R)\lambda^{(m)}}{\pi R^{1/2} \left[ m - \frac{\phi}{\pi} - \frac{\lambda^{(m)}}{\pi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \lambda} \right]} \quad (6)$$

上式中已引入高反射金属膜的平均反射率  $R$ , 和相移  $\phi$ 。假定金属膜  $M_1$  与  $M_2$  完全对称,则有

$$T = \sqrt{T_1 T_2}, \quad R = \sqrt{R_1 R_2},$$

$$\phi = \frac{1}{2}(\phi_1 + \phi_2)$$

又因  $R + T + A = 1$ , 故得

$$\tau_{\max} = \frac{T^2}{(1-R)^2} = \frac{1}{(1+A/T)^2} \quad (7)$$

$$\lambda^{(m)} = \frac{2nt}{m + \phi/\pi} \quad (8)$$

公式(6)中分母的最后项为反射相移色散(通常被忽略了)。

由公式(8)可看出,最大透射率所在波长  $\lambda^{(m)}$ (主峰位置)不仅与间隔层的光学厚度( $nt$ )有关,而且决定于间隔层与高反射金属膜界面的反射相移(严格地说,还与透射相移以及相移色散有关)。假定反射相移在通带区内为常数,并假定半透明金属膜的光学常数与其厚度关系甚微,则可由下式求得反射相移值:

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{2nK_1}{n^2 - n_1^2 - K_1^2} \right) \quad (9)$$

$n$  为间隔层折射率,对氟化镁膜而言,  $n \approx$



1.39.  $n_1 = n_1 - iK_1$  为金属膜的光学常数 (也称复折射率)。上式给出的  $\phi$  值, 实际上为不透明金属膜界面的反射相移。对于铝膜来说, 其在紫外区的光学常数与蒸镀条件密切相关<sup>[7]</sup>, 故应根据各人所镀膜层进行实际测量而求得  $n_1$  与  $n_2$ 。我们未能实测, 仅援引哈斯等<sup>[10]</sup>的数据进行计算。由于  $n$  与  $K_1$  始终是正数, 因此, 由公式(9)求得  $\phi$  值将在第一与第二象限内, 所以, 代入公式(8)中的主值将在  $0 \sim \pi$  之间。 $\phi$  的数值表明, 主峰波长将从间隔层光学厚度为  $\frac{\lambda^{(m)}}{2}$  的位置

向短波方面移动。移动的波长数值可根据公式(9)与(8)计算出来。

### 三、控制过程

在制造金属膜滤光片时, 应首先根据所需透射率值  $\tau_{\max}$ , 确定满足公式(4)的  $T_1$ 、 $R_1$  与  $T_2$ 、 $R_2$ , 然后可确定具有规定  $R_1$ 、 $T_1$  值的  $M_1$  膜与  $R_2$ 、 $T_2$  值的  $M_2$  膜的厚度。假设两金属膜  $M_1$  与  $M_2$  完全一致, 则可由下述方程求得不同厚度的金属膜的反射率  $R$  与透射率  $T$ <sup>[11]</sup>:

$$R = \frac{(g_1^2 + h_1^2) e^{2\alpha_1} + (g_2^2 + h_2^2) e^{-2\alpha_1} + a \cos 2\beta_1 + b \sin 2\beta_1}{e^{2\alpha_1} + (g_1^2 + h_1^2)(g_2^2 + h_2^2) e^{-2\alpha_1} + c \cos 2\beta_1 + d \sin 2\beta_1} \quad (10)$$

$$T = \frac{n_s}{n_0} \cdot \frac{[(1+g_1)^2 + h_1^2][(1+g_2)^2 + h_2^2]}{e^{2\alpha_1} + (g_1^2 + h_1^2)(g_2^2 + h_2^2) e^{-2\alpha_1} + c \cos 2\beta_1 + d \sin 2\beta_1} \quad (11)$$

式中

$$a = 2(g_1 g_2 + h_1 h_2)$$

$$b = 2(g_1 h_2 - g_2 h_1)$$

$$c = 2(g_1 g_2 - h_1 h_2)$$

$$d = 2(g_1 h_2 + g_2 h_1)$$

$$g_1 = \frac{n_0^2 - n_1^2 - K_1^2}{(n_0 + n_1)^2 + K_1^2}$$

$$g_2 = \frac{n_1^2 - n_s^2 - K_1^2}{(n_1 + n_s)^2 + K_1^2}$$

$$h_1 = \frac{2n_0 K_1}{(n_0 + n_1)^2 + K_1^2}$$

$$h_2 = \frac{2n_s K_1}{(n_1 + n_s)^2 + K_1^2}$$

$g_1$ 、 $g_2$  与  $h_1$ 、 $h_2$  称为菲涅耳系数, 其中  $n_1 = n_1 - iK_1$  为铝膜光学常数;  $n_s$  为基片折射率。 $n_0$  为入射媒质 (通常为空气, 在此为氟化镁膜) 的折射率;  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$  为铝膜的相位厚度的虚部与实部; 由下式确定:

$$\alpha_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot K_1 t_1, \quad \beta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_1 t_1 \quad (12)$$

根据所要求的铝膜厚度 (约 200~300 埃), 算出铝膜的  $T$  或  $R$  后, 便可在透明基片 (通常为石英玻璃) 上镀出有规定透射率  $T$  或反射率  $R$  的铝膜。然后, 镀一层适当厚度的

介质膜 ( $MgF_2$ ), 使界面反射相移被抵消, 即相当于镀一层内增透膜, 其厚度应满足增透条件:

$$nt = \frac{\lambda_0^{(m)}}{4\pi} \cdot \phi \quad (13)$$

紧接着按所要求的干涉级次 ( $m$ ), 镀  $m$  个半波长厚度的介质膜 ( $MgF_2$ )。最后, 应继续镀一层厚度满足方程(13)的介质膜 ( $MgF_2$ ), 前提是在两金属反射膜  $M_1$  与  $M_2$  完全一致的条件下。紧接着镀一层铝膜  $M_2$ , 则得到了滤光片。此时其通带业已形成, 如要制造多半波滤光片, 则应按上述方式继续镀下去。

对于远紫外区使用的滤光片, 由于铝膜会遭氧化而性能变坏, 故应在镀完最后一层铝膜之后, 迅速镀一层满足公式(13)的保护膜 ( $MgF_2$ )。这层膜既有保护作用, 又起增透效果。

为使直接法发挥最佳效果, 必须用滤光片的主峰波长作控制波长, 并且当透射率或反射率 (均随膜厚而变化) 达极值时停镀。例如, 要制造  $\lambda_0 = 2200$  埃的滤光片, 便应用波长 2200 埃的单色光进行膜厚控制。且单色性要足够好, 强度应足够稳定, 故以激光器

或线状光谱灯作光源为佳,也可用紫外单色器。用紫外灵敏的光电元件为接收器,用检流计或函数记录仪显示(见表1)。

表1 镀膜过程的显示( $\lambda_0=2200$ 埃)

膜层	相对读数	备注
Al	145~35	第一高反射膜
MgF <sub>2</sub>	90~132	前反射相移补偿层
	132~90~131~89~130	二级次间隔层
	130~91	后反射相移补偿层
Al	80~118	第二高反射膜
Al	145~35	高反射镜
MgF <sub>2</sub>	90~130~89~131~91	前后反射相移补偿层和一级次间隔层
Al	80~120	高反射镜
MgF <sub>2</sub>	100~118	增透保护膜

如果缺乏适用的紫外单色光源和接收器,则可通过上述公式进行计算<sup>[1]</sup>,求出适当的控制波长 $\lambda$ ,以制出 $\lambda_0$ 的滤光片。亦可用次级低的干涉次峰波长控制高级次的主峰波长的滤光片,即用长波控制短波区的滤光片。例如,我们曾用 $\lambda_1=4150$ 埃与 $\lambda_2=6750$ 埃的单色光进行膜厚控制,制成了主峰在 $\lambda_0=2200$ 埃的二级次与三级次紫外滤光片(见表2)。根据滤光片理论, $\lambda_1$ 应为 $\lambda_0$ 的两倍, $\lambda_2$ 应为 $\lambda_0$ 的三倍,然而由于相移色散等

表2 镀膜控制过程示范( $\lambda_0=2200$ 埃)

膜层	控制波长	读数	备注
Al	$\lambda_1=4150$ 埃	145~28	前反射镜
MgF <sub>2</sub>	$\lambda_1$	90~134.4~92	前后补偿层与间隔层
Al	$\lambda_1$	50~47~95	后反射镜
MgF <sub>2</sub>	$\lambda_1$	90~94	保护用的增透层
Al	$\lambda_2=6750$ 埃	145~29	前反射镜
MgF <sub>2</sub>	$\lambda_2$	90~132~89	前后补偿层与间隔层
Al	$\lambda_2$	85~146	后反射镜
MgF <sub>2</sub>	$\lambda_2$	68~75	保护用的增透膜

的影响,故作了相应修正。当后反射镜镀完后,通带业已形成。

#### 四、结语与讨论

作者所提出的方法<sup>[1]</sup>,由于直接控制连续各层膜的镀膜,使得金属膜与介质膜间隔层界面的反射相移得到了补偿(最近国外有类似我们所提方法的文章报导<sup>[12]</sup>),因此,虽然因蒸发条件和操作技巧不同,使得每次所镀铝膜的光学常数与厚度不尽相符,从而使反射相移 $\phi$ 有所差异;但由于紧接着的氟化镁是直接镀在铝膜上面的,且根据工件本身来控制,故彼此是相关的, $\phi$ 的变化则通过氟化镁膜来补偿。故减少了总的误差,正如[1]所证明的,提高了主峰波长定位精度。

然而,为得到优质的紫外金属膜滤光片,除必须尽快地将高纯铝蒸镀在冷基片上,并使各层膜的蒸发速率保持恒定外,还必须对个别层膜厚有更精确的控制,尤其是后反射镜的极大值点的精确控制。因为由于间隔层未镀够,后反射膜可予以补偿(见表2)。但当后反射膜过厚,则其透射率越过极值点而向减小方向运动,因而大大降低了滤光片的总透射率,且使主峰有所偏离。如果过头尚不多,则可用最后一层增透膜进行补救。例如,我们镀过这样的滤光片(表3),虽然后反射膜过厚,回头了25格,但仍得到较满意的结果:控制波长为4250埃,二级次主峰在2240埃处,主峰透射率为41%,半宽度为240埃。但是,如果整个膜系用直接法控制,而个别膜层厚度用带补偿机构的极值法或波长扫描法<sup>[13]</sup>配合控制,则可进一步提高主峰定位精度。

其次,应尽可能用主峰波长 $\lambda_0$ 来进行控制,才能充分发挥本方法的直观与简便这一优点。这样一来,便可不考虑膜层的光学常数具体数值。若条件允许,则最好能对自己实际所镀膜层进行就地测量,以得到一定蒸



表3 镀膜过程显示

膜 层	相 对 读 数	备 注
Al	145~33	前反射镜
MgF <sub>2</sub>	90~130~91	间隔层
Al	60~55~100~75	后反射镜
MgF <sub>2</sub>	80~91	增透保护层

镀条件下的光学常数值, 然后代入上述公式计算, 求出适当的相应控制波长, 最后用直接法进行控制。我们是按哈斯<sup>[10]</sup>给出的数据进行计算的。并根据镀膜机与控制系统等具体条件的不同, 作了修正。

本方法所制成的紫外滤光片, 与其他方法的制成品一样<sup>[2~4]</sup>, 其性能会随时间稍有变化, 大约一周后方趋于稳定。这主要也许是膜层间相互渗透扩散以及吸附气体所致。

本方法可用于任何波段, 只要有适当的单色光源和相应的探测器。其最大优点是简便、直观, 且主峰定位精度比间接法控制有明

显的提高。

### 参 考 资 料

- [1] 尹树百等,《光学工程》, 1976, No. 4, 1.
- [2] D. J. Schroed; *JOSA*, 1962, **52**, 1380
- [3] B. Anders *et al.*; *Appl. Opt.*, 1966, **5**, 971.
- [4] D. H. Harrison; *Appl. Opt.*, 1968, **7**, 210.
- [5] H. Anders *et al.*; *Optik*, 1974, **40**, No. 3, 358.
- [6] G. Baldini *et al.*; *Thin Solid Films*, 1972, **13** 143.
- [7] И. А. Фурман; *ОМП*, 1968, № 9, 54; 1967, № 1, 39.
- [8] P. Bousguet; *Thin Solid Films*, 1972, **13**, 285.
- [9] H. Anders; *Dünne Schichten für die Optik*, p. 94, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart(1965).
- [10] D. E. Gray Co. Ed., American Institute of Physics Handbook, p. 6~107, McGraw-Hill Book Company, Inc.(1963), N. Y.
- [11] O. S. 希文斯,《固体薄膜的光学性质》,第四章,尹树百译,国防工业出版社(1965).
- [12] R. Arsenault *et al.*; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 7, 1890.
- [13] 钟秀清,朱震;《激光与红外》,1976, No. 4, 1.

## 拉晶转速的程控与测量

中国科学院上海光机所十二室自控组

随着温度自动控制仪表的广泛使用, Nd:YAG、YAP 晶体质量有了较大提高。但是, 要使整根晶体都保持良好的光学质量仍存在一定的困难。这是由于在引上法生长激光晶体时, 晶体转速的稳定直接影响晶体质量。为了保持固-液界面平坦, 还需要在拉晶过程中使晶体转速在一定范围内缓慢变化。根据我所的实践, 在~90 转/分的恒定转速下, Nd:YAG、YAP 晶体生长的固-液界面往往经历由凸到平、到凹的变化。而在凸和凹的固-液界面中不能得到光学均匀性良好的晶体。故采用变转速生长, 即开始以 80~100 转/分下品种, 然后逐渐降慢转速,

至拉晶结束时为 30~50 转/分。这样便可以获得整根晶体基本上是平坦的生长面。“转速程控-测量仪”不仅能控制晶体转速稳定, 而且可以根据需要按所要求的一定程序来改变转速, 并随时测量转速。可见本仪器在引上法生长工艺中是十分有价值的<sup>[1,2]</sup>。

### 工作原理

为了实现激光晶体 Nd:YAG、YAP 的变转速生长, 并达到高的转速稳定度, 使用一般的手动调速电路既达不到上述要求, 又使劳动强度增大。本仪器采用步进电机作程序控制, 调速电路加电压负反馈、电流正反馈、电流截止负反馈等措施, 从而提高转速的