

一种任意折射率组合膜的计算及其制备方法

孙平 齐钰

摘要：文中推导出的层组合膜的计算公式，给出组合膜计算程序框图，介绍了在实验中制备等效折射率的一种简便方法。

一、前言

为提高光学系统的像质，减少各界面的反射，在各个镜头表面要镀制宽带减反射膜。对于一个100倍的光学显微镜物镜，其镜头折射率为1.43—1.83，据此设计出三层宽带减反射规整膜系，其内层折射率为1.58—1.76。例如：在基底折射率 $n_s = 1.61$ 的玻璃上镀制宽带减反射膜，由限定条件^[1]设计的膜系为：

$$\left\{ \begin{array}{l} G - 1.75 - 2.3 - 1.46 - A \\ \frac{\lambda_o}{2} - \frac{\lambda_o}{2} - \frac{\lambda_o}{4} \end{array} \right.$$

内层折射率为1.75。由于光学薄膜材料有限，不能满足中间折射率的要求，因此限制了三层宽带减反射膜的实现。目前通用的办法是根据等效概念，采用组合膜法来解决。本文给出的组合膜设计程序，使组合膜的制备进一步简单化。

二、组合膜的计算

所谓组合膜法就是用—个高折射率材料 n_H 和—个低折射率材料 n_L 组合成—个折射率为 n_o 的 $\frac{1}{4}\lambda$ 厚的单层膜， n_o 定义为等效折射率， n_H, n_L, n_o 应满足关系式 $n_L < n_o < n_H$ 。图1为等效示意图。

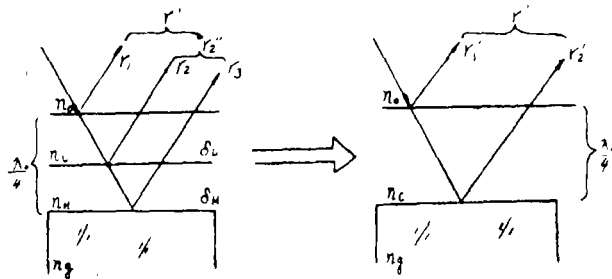


图1 等效示意图

当光线以波长 λ_0 垂直入射时, 在各个界面上的菲涅耳系数为^[2]:

$$r_1 = \frac{n_0 - n_L}{n_0 + n_L}, \quad r_2 = \frac{n_L - n_H}{n_L + n_H}, \quad r_3 = \frac{n_H - n_g}{n_H + n_g}$$

$$r_1' = \frac{n_0 - n_c}{n_0 + n_c}, \quad r_2' = \frac{n_c - n_g}{n_c + n_g}$$

r_1' , r_2' 位相相同, 干涉极大, 其合矢量 $r' = |r_1'| + |r_2'|$ 。

为满足反射率极大值的条件, r_2 , r_3 的合矢量 r_2'' 必须与 r_1 同向, 又为了满足等效折射率条件, r_1 , r_2'' 的合矢量必须等于 r' , 即:

$$|r_1| + |r_2''| = |r'|$$

$$\text{从而 } |r_2''| = |r'| - |r_1|$$

又 \vec{r}_2 , \vec{r}_3 , \vec{r}_2'' 构成封闭三角形, 如图

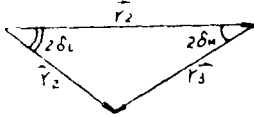


图2 $\vec{r}_2, \vec{r}_3, \vec{r}_2''$ 构成封闭三角形

2 所示。

由余弦定理可求出组合膜内、外层对应的位相厚度 δ_H, δ_L 。

$$\cos 2\delta_H = \frac{|r_2|^2 + |r_3|^2 - |r_2''|^2}{2|r_2| \cdot |r_3|} \quad (1)$$

$$\cos 2\delta_L = \frac{|r_2|^2 + |r_2''|^2 - |r_3|^2}{2|r_2| \cdot |r_2''|} \quad (2)$$

由 $\delta_H = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_H d_H$ 和 $\delta_L = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_L d_L$ 即可计算出组合膜内、外层对应的光学厚度 $n_H d_H$ 和 $n_L d_L$ 。

对应于位相厚度为 δ_H , 折射率为 n_H 的单层膜的反射率 R_H 可由下式给出^[3]:

$$R_H = \frac{(n_0 - n_g)^2 \cos^2 \delta_H + \left(\frac{n_0 n_g}{n_H} - n_H \right)^2 \sin^2 \delta_H}{(n_0 + n_g)^2 \cos^2 \delta_H + \left(\frac{n_0 n_g}{n_H} + n_H \right)^2 \sin^2 \delta_H} \quad (3)$$

三、组合膜计算程序框图

根据上述组合膜的计算方法, 当给定 $n_0, n_g, n_L, n_H, \lambda_0$ 和 n_c 后, 即可计算出组合膜各层膜的位相厚度 δ_H, δ_L , 进而求得 $n_H d_H$ 和 $n_L d_L$ 及对应的反射率 R_H 和 R_L ; 若给定膜厚控制仪表——放大器指针的起始位置 X_0 后, 即可求得 R_H 对应的指针终止位置 X_H 。

计算程序的框图如下:

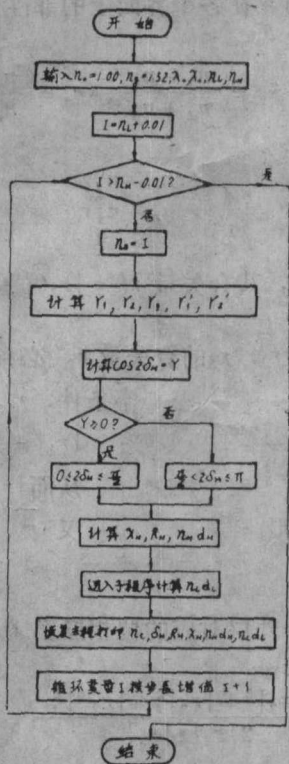


图3 组合膜计算程序框图

四、制备方法及其实验结果

整个膜厚控制采用光电极值法。根据光的干涉原理，对应一定的膜厚有一个对应的反射率 R ，此反射率在放大器中由指针所走的格数 X 表示。在放大器线性内走格数 X 正比于反射率 R 。用单面磨毛的 K_2O 玻璃作为控制片，蒸镀前使指针示于 X_0 位置，那么 X_0 对应的控制片反射率为 4.2%。欲获得一个折射率为 n_c 、厚度为 $\frac{\lambda_0}{4}$ 的单层膜，事先应由计算程序算出组合膜中高折射率 n_H 层反射率 R_H 所对应走的格数 X_H ，制备时只需使高折射率材料层镀至 X_H ，再由低折射率材料走至极值即可完成折射率为 n_c 的组合膜。

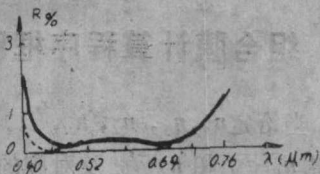


图4 CaF_2 基底上三层宽带减反膜实测光谱反射，内层膜为组合膜 $n_s = 1.57$ 。实线为实测光谱反射曲线，虚线为理论计算值。

表 1 给出了某些等效折射率对应 $\delta_H, R_H, X_H, n_H d_H, n_L d_L$ 的计算结果。

表1 等效折射率 n_c 及其对应值

对应值	δ_H ($^\circ$)	R_H (%)	X_H (格数)	$n_H d_H$ (\AA)	$n_L d_L$ (\AA)
1.67	8.5	4.9	35.0	128.7	834.3
1.68	9.6	5.1	36.4	144.9	894.7
1.69	10.7	5.3	37.8	160.6	779.1
1.70	11.7	5.6	40.0	176.0	756.6
1.71	12.7	5.8	41.4	191.1	736.5
1.72	13.7	6.0	42.8	206.1	718.4
1.73	14.7	6.3	45.0	220.9	701.3
1.74	15.7	6.6	47.1	235.5	685.6
1.75	16.6	6.9	49.2	250.0	670.9
1.76	17.6	7.2	51.4	264.5	657.0

注: 取 $\lambda_0 = 5400 \text{\AA}$, $X_0 = 30$, $n_L = 1.62$, $n_H = 2.25$

表2给出了某些等效折射率对应组合膜的实验结果。

表2 n_c 的理论值与实验结果的比较

n_H	n_L	n_c 理	n_c 测量
1.38	1.62	1.58	1.57
1.38	1.62	1.56	1.55
1.62	2.25	1.70	1.68
1.62	2.25	1.73	1.71

可见实验结果同理论计算相吻合。

图4为CaF₂基底上三层宽带减反膜实测光谱反射曲线, 其内层为按上述方法实现的 $n_s = 1.57$ 组合膜。图见第10页。

五、讨 论

放大器线性的优劣直接影响着组合膜法制备的成败。我们使用的是沈阳仪器仪表所生产的MKY光学膜厚控制仪, 它的线性灵敏区在30—70格之间, 所以组合时应尽量在此区间组合。遗憾的是该放大器线性有限, 加之 n_c 的测量有误差, 使得 n_c 的实验结果和理论值稍有偏差, 但二者已基本吻合。其次, 采用折射率稳定的镀膜材料和保证始终如一的蒸发条件是取得理想组合膜必不可少的先决条件。值得强调的一点是, 本文所谓的等效只对中心波长 λ_0 而言, 因此对宽带而言有一定局限。

总之, 组合膜法可以制备中间折射率, 从而保证三层宽带减反膜的实现, 而且这种方法在实验中简单易行, 直观方便。

冯纪蒙、张德霞同志协助完成了实验工作, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 齐钰,《光学学报》,1987年,9期
- [2] 唐晋发,郑权著,《应用薄膜光学》上海科学技术出版社,上海1986,P122
- [3] 梁铨廷,《物理光学》(机械工业出版社,北京,1980) P90

A Method of Calculating and Preparing Arbitrary Refractive Index Combined Films

Sun Ping Qi Yu

Abstract

In this paper, formulae for two-layer combinative film are deduced, the program block diagram used for calculating the two-layer combinative film is given out and an easy way telling us how to prepare the equivalent index in experiment is introduced.