

宽带增透膜反射光谱的理论 与实测偏差的修正

缪毅强¹⁾ 毛书正²⁾ 罗琦琨³⁾

(¹⁾上海第二医科大学物理教研室,上海,200025;(²⁾上海真摯镀膜有限公司,上海,200127;

(³⁾海军医学研究所计算机室,上海,200433)

摘要 探讨用折射率补偿即改变厚度的方法,并辅助于计算机修正来矫正真空镀膜法生产宽带增透膜时实验值与理论值存在的偏差,取得了良好效果,成功用于实际生产。

关键词 膜系结构,反射率,真空镀膜,增透膜,折射率补偿。

CORRECTION OF DEVIATION BETWEEN THEORY AND EXPERIMENT FOR REFLECTION SPECTRUM OF BROAD-BAND ANTI-REFLECTION COATING

MIAO Yi-Qiang¹⁾ MAO Shu-Zheng²⁾ LUO Qi-Kun³⁾

(¹⁾Department of Physics, Shanghai Second Medical University, Shanghai 200025, China;

(²⁾ Shanghai Loyal Coating CO., Ltd, Shanghai 200127, China;

(³⁾ Department of Computer, Naval Medical Research Institute, Shanghai 200433, China)

Abstract By compensation of refractive index, changing the thickness, and using computer-aided design, a method was studied for correcting the deviation between theory and experiment in the reflection curve when a broad-band anti-reflective coating was produced with vacuum coating process. The method gets a good result and is used successfully in practical production.

Key words film system structure, reflectivity, vacuum coating, anti-reflective coating, compensation of refractive index.

引言

在光路设计中,为了减少光学镜头表面反射引起的光能的损耗,在光学透镜外表面镀增透膜,以增加光通量。最初的增透膜,是用化学镀膜来实现减少反射效果的,由于化学镀膜不能精确地控制光学薄膜的厚度,因而它的使用受到一定的限制。随着科学技术的发展,用光学极值法控制的物理真空镀膜应运而生,逐渐成为国内光学仪器生产厂家镀膜的主要手段。

虽然用光学极值法生产镀制膜堆干涉滤光片和增透膜具有很好的光学重复性,但是,由于极值法在控制非1/4波长膜系中的缺陷,以及在实际使用中镀膜材料没有任意的折射率,使得用光学极值法镀

制宽带增透膜的应用受到了很大的限制。

随着计算机技术的飞速发展和膜系设计的优化,使得镀制3层以上的非1/4波长膜系变得轻而易举,例如在眼镜行业中能非常经济地大批量生产镀膜镜片。

但是,由于目前工艺参数的不确定性、生产设备的不稳定性、镀膜材料没有达到理论计算所要求的任意数值的折射率以及折射率的不均匀性对增透膜的影响^[1]等诸多原因,使得镀多层膜后的光谱特性和理论值总是存在着偏差,如何使镀膜后的测量值和理论值吻合,在实际生产工艺上是很重要的问题。本研究小组借助于计算机辅助设计就如何纠正这一偏差进行了研究,并且在实际生产中取得了很好的效果。

1 宽带增透膜的光学特性

若光学镜片基底的折射率为 n_g , 当光从空气中经过厚度为 d 的单层无吸收介质薄膜(折射率为 n_1)时, 若入射角为 i_0 , 则单层膜的反射率可写成^[2]

$$R = \frac{(1 - n_g)^2 \cos^2 \frac{\delta_1}{2} + (n_g/n_1)^2 \sin^2 \frac{\delta_1}{2}}{(1 + n_g)^2 \cos^2 \frac{\delta_1}{2} + (n_g/n_1)^2 \sin^2 \frac{\delta_1}{2}} \quad (1)$$

式(1)中 $\delta_1 = \frac{4\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos i_1$, 为了研究方便, 我们假使入射角为 0° (也可推广到入射角不为零的情况), 介质薄膜的光学厚度 $n_1 d_1 = \lambda/4$ 时式(1)可简化为

$$R_{\lambda_0} = \left(\frac{n_g^2 - n_1^2}{n_g^2 + n_1^2} \right)^2 \quad (2)$$

由式(2)可知反射率的高低与单层膜的折射率 n_1 的大小有关, 因为目前介质材料可供选择的余地不大, 所以镀单层介质膜后一般不能做到中心波长 λ_0 处反射率为零。

为了在 λ_0 的中心波长处获得零反射, 可在光学镜片上先镀一高折射率材料的膜层(折射率 n_H), 然后再镀一层低折射率(n_L)材料, 这就是双层膜。

对于中心波长 λ_0 膜层和基片组合的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_L & \frac{i}{n_L} \sin \delta_L \\ i n_L \sin \delta_L & \cos \delta_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_H & \frac{i}{n_H} \sin \delta_H \\ i n_H \sin \delta_H & \cos \delta_H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_g \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中 $\delta_L = 2\pi n_L d_L / \lambda_0$, $\delta_H = 2\pi n_H d_H / \lambda_0$, 光学导纳 $Y = C/B$ 。

由式(3)可知: 当 $n_0 = 1$ 时, $\delta_L = \frac{\pi}{2}$, $\delta_H = \frac{\pi}{2}$,

则 $n_H = \sqrt{n_g n_L}$ 。

正是使 $R = 0$ 的条件, 当在给定折射率的条件下, 适当地选择两层膜的位相厚度, 则可使 λ_0 处反射率为零。

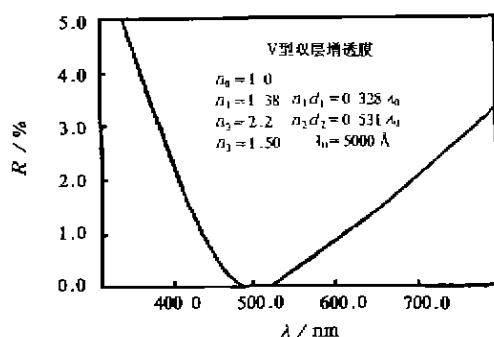


图1 V形双层增透膜的反射曲线

Fig. 1 The reflection curve of a V-shaped double-layer anti-reflection coating

双层增透膜对于 λ 虽然能获得零反射的效果, 但形成的光谱特性为 V 型增透膜, 双层增透膜还是会形成过大的反射率和过窄的光谱带宽度(见图1)^[3]。而且, 其中心反射率与选择材料的折射率有很大的关系。为了达到在较宽的波段范围内反射率都比较低(即所谓的 W 膜), 则有必要镀制 3 层或更多层的宽带增透膜。国内一般 4 层膜的透射率 $\geq 99.5\%$, 带宽约为 $400 \sim 680 \text{ nm}$, 理论计算最好为 $400 \sim 710 \text{ nm}$ ^[4]。对多层膜而言, 膜系的特征矩阵为^[5]

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{n_j} \sin \delta_j \\ i n_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_{k+1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

计算机自动控制技术的发展, 很容易镀制多层(3 层以上)非 $\lambda/4$ 膜系, 因而现代真空镀膜一般都采用多层(例如本文所采用的 8 层膜)。

2 理论和实测的偏差

一般在镀制多层膜后, 实测的光谱曲线总是与理论计算的曲线产生偏差。例如, 在 $n = 1.52$ 的玻璃上镀膜时, 我们选择 8 层膜系来达到宽带增透的效果, 其 8 层膜系结构如表 1 所列。

在 SATIS MC260 真空镀膜机上得到了如图 2 所示宽带 8 层膜的反射光谱特性实测曲线, 其所对应的理论计算曲线如图 3 所示(参见: Satis Vacuum

表 1 实验用镀膜材料的折射率与厚度

Table 1 The refractive index and thickness of experimental coating materials

膜 层	0	1	2	3	4	5	6	7	8	基片
材 料		L_1	L_2	H_1	H_2	L_1	H_1	L_2	L_1	
折射率 n	1	1.36	1.478	2.049	2.270	1.478	2.049	1.478	2.2	1.52
厚度 $D(\text{nm})$		40.0	837	53.5	1129	331	171	350	6	

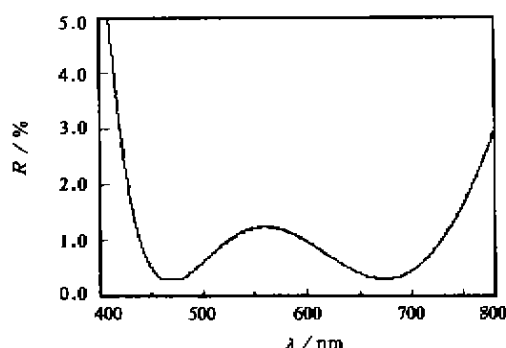


图 2 宽带 8 层增透膜的反射光谱实测曲线
Fig. 2 The measured reflection curve of a broad-band eight-layer anti-reflection coating

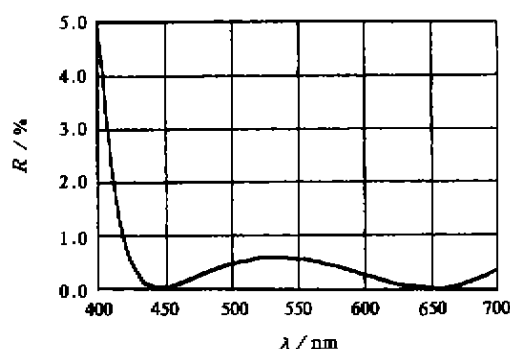


图 3 宽带 8 层增透膜的反射光谱理论计算曲线
Fig. 3 Theoretical reflection curve of a broad-band eight-layer anti-reflection coating

Industries, Process Parameters Datasheet, 1997, Section A:2).

由图 3 的理论曲线,我们可以看出其反射光谱特性非常完美,但是,在实际生产工作中,我们的实测曲线一般如图 2 所示.比较两者,我们发现它们之间有很大的偏差,如在 400 nm 处理论曲线的反射率小于 5%,而实际曲线则大于 6%;在 550 nm 处理论曲线的反射率约为 0.5%,而实际曲线则达 1.5%;在 450 和 650 nm 处理论曲线的反射率为 0,而实际曲线则大于 0.为了缩小两者之间的偏差,我们曾尝试用纯粹控制镀膜工艺参数来修正偏差,但效果不理想,于是我们尝试在不改变膜系的前提下,用补偿折射率的方法来修正偏差.

要得到稳定的、与理论曲线完全相符的光谱曲线,必须控制许多工艺参数,如烘烤温度、基片温度、蒸发进度、真空度……等等,而其中有些参数将对光谱特性产生重要的影响,尤其是宽带增透膜波峰反射是一个必须绝对控制的要素.

在真空镀膜实施中,由于基片烘烤温度在整个

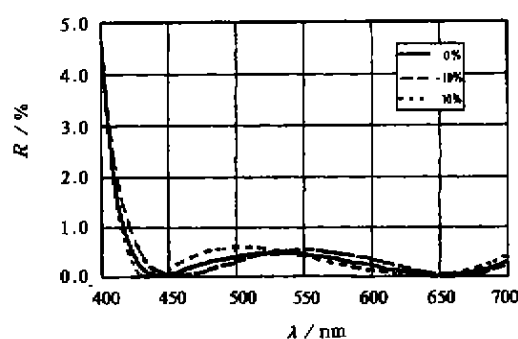


图 4 第 5 层膜的厚度变化对反射曲线的影响
Fig. 4 Influence of change of the 5th layer thickness on the reflection curve

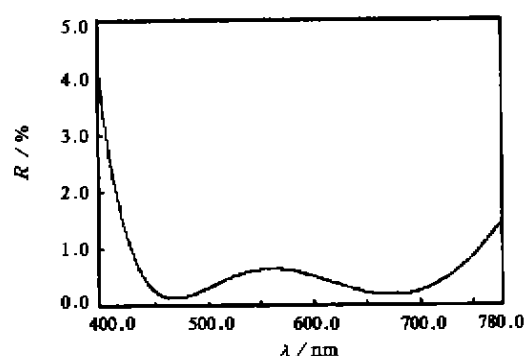


图 5 经折射率补偿法矫正过的宽带 8 层增透膜的反射光谱实测曲线
Fig. 5 The measured reflection curve of a broad-band eight-layer anti-reflection coating corrected by compensation of refractive index

镀膜过程中有一个波动范围,并且材料的蒸发也是不恒定的^[6].所以,膜层的结构应是不均匀和不致密的,即材料的折射率是不均匀的.薄膜的吸收系数和折射率会发生较大的变化^[7].据此,我们有理由认为,理论曲线和实际曲线的偏差是由于膜层材料,如 TiO_2 实际折射率和理论折射率存在着偏差而产生的.我们认为, TiO 和 Ti_2O_3 作为蒸发时的副产品,对 TiO_2 的折射率会使之成为一个不恒定的变化值.在实际工作中,可能对二氧化钛折射率产生影响的因素还有:烘烤温度、蒸发速率,充氧速率,真空度、工作旋转速度、基片温度等等.

我们将 TiO_2 的折射率作为一个变量来考虑,在实际工作中,通过调节膜层的厚度对折射率进行补偿.借助于计算机辅助设计,对膜层进行了逐层分析、纠正,发现第五层膜(TiO_2)对曲线的影响最大(如图 4 所示).由于该层光学厚度 $n_5 d_5$ 中的 n_5 理论值是固定不变的,则当我们对物理厚度 d_5 按其蒸发

速率(A^{-1}/s)进行修正时,发现整条曲线产生了变化,同时我们对 TiO_2 蒸发时的充氧速率进行调整,最后得到如图 5 所示的曲线,可见,其与理论曲线相比较已很接近。

3 结论

我们的实验结果表明,当将 n_4d_3 作为一个整体变量来考虑作修改时,物理厚度 d_3 可作为粗调,而用控制烘烤温度、充氧速率等工艺参数来作为微调,可得到与理论值较吻合的实测曲线。虽然宽带增透膜的增透效果受工艺参数影响很大,但如从单纯的控制各工艺参数来修整曲线,则不易达到理想状态。而采用调节膜层厚度的折射率补偿法并辅助控制工艺参数的方法,则可达事半功倍的效果。

REFERENCES

- [1] Vermeulen A J. Influence of inhomogeneous refractive indices in multilayer anti-reflection coatings. *Optica Acta*, 1976, **23**(1):71
- [2] TANG Jin-Fa, ZHENG Quan. *Applied Film Optics*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Press (唐晋发,郑权. 应用薄膜光学. 上海:上海科学技术出版社), 1984, 118
- [3] MU Guo-Guang, ZHAN Yuan-Ling. *Optics*. Beijing: People's Education Press (母国光,战元令. 光学. 北京:人民教育出版社) 1979, 449
- [4] WANG Xi-Quan. Theoretical calculation of high anti-reflective film in visible spectrum region. *Applied Optics* (王希权. 可见光高增透膜的理论计算. 应用光学), 2000, **21**(3):47
- [5] TANG Jin-Fa, ZHENG Quan. *Applied Film Optics*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Press (唐晋发,郑权. 应用薄膜光学. 上海:上海科学技术出版社), 1984, 51
- [6] LIN Jian, LIN Yong-Zhong. Design of corrective baffle of optical film thickness. *Journal of Photonics* (林坚, 林永钟. 光学薄膜厚度修正挡板的设计. 光子学报), 1999, **28**(9):841—844
- [7] Akahira N, Ohta T, Yamada N, *et al.* Sub-oxide thin film for an optical recording disk. In: *Proc. SPIE*. 1982, **329**:195—200