

文章编号 : 1002-1582(2005)05-0672-03

膜料吸收系数对光学膜厚宽带监控的影响*

韩军^{1,2}, 孔英秀², 尚小燕², 安毓英¹

(1. 西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071; 2. 西安工业学院 光电工程学院, 西安 710071)

摘 要 : 光学镀膜宽带监控的判停依靠测量曲线和理论曲线的吻合程度来进行, 这要求对理论曲线进行符合薄膜镀制实际的修正。在介绍光学镀膜宽带监控技术的原理及现状的基础上, 针对由于材料的吸收而产生的测量曲线和理论曲线的严重背离, 提出了一种逐层修正的方法。试验结果表明, 其效果良好, 完全可以满足实际镀膜的需要。

关 键 词 : 镀膜; 宽带监控; 吸收; 逐层修正

中图分类号 : O484.5 文献标识码 : A

Absorption coefficient of thin-film material affection
optical coating wideband monitoring technology

HAN Jun^{1,2}, KONG Xiu-ying², SHANG Xiao-yan², AN Yu-ying¹

(1. School of Technical Physics, Xidian University, Xian 710071, China)

(2. Department of photoelectric engineering, Xian Institute of Technology, Xian 710071, China)

Abstract : Termination of optical coating wideband monitoring depends on overlapping stage of the theoretical curve and the measured curve, which requires that the theoretical curve is corrected in order to agree with practical deposition process. The principle and the present state of optical coating wideband monitoring technology were introduced. Based on the absorption of thin-film material resulting in heavy divergence between the theoretical curve and the measured curve, a method of layer-by-layer correction was put forward. By experiment, the result indicated that this method can satisfy the practical deposition requirement sufficiently.

Key words : coating ; wideband monitoring ; absorption ; layer-by-layer correction

1 引 言

光学薄膜的光学特性与其每一层的厚度密切相关, 为了镀制符合要求的光学薄膜, 在制备过程中必须监控膜厚。随着光学薄膜复杂性和精度要求的不断提高, 过去的监控方法已经无法满足要求。近年来, 一种直观易用的监控技术-宽带监控技术^[1,2]逐步成熟并得到应用, 德国、美国、日本等多个国家的企业相继开发出了该类型的产品^[3-5]。

宽带监控技术是利用实测的宽光谱扫描曲线与理论计算的目标光谱曲线进行实时比较, 以评价函数的反馈比较结果给控制系统一种膜厚监控方法。

设待镀光学薄膜第 j 层的目标光谱透射比曲线为 $T_j(\lambda, n_i d_i)$, 在镀制过程中实测透射比曲线为 $T_j(\lambda, nd)$, 则定义评价函数为

$$F_j = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |T_j(\lambda, n_i d_i) - T_j(\lambda, nd)| d\lambda$$

在蒸镀过程中用计算机连续计算该评价函数, 当 F_φ 取得极小值时停止蒸镀^[6]。与现在最常用的单波长光电极值法监控技术相比较, 宽带监控法精度高, 膜层监控可重复性好, 对非规整膜系的监控具有优越性, 并且在蒸镀过程中测量和记录了整个波段内的透(反)射比变化的情况, 所得信息丰富, 有利于实时地测量薄膜的折射率、折射率色散、吸收系数和非均匀性, 可以通过实测光谱曲线与薄膜产品最终要求曲线进行比较方便地判定产品是否合格, 所以宽光谱监控法应用前景十分广泛。

2 宽带监控技术的主要缺陷

宽带监控镀膜的主要缺点在于要预先知道目标光谱透射比(或反射比), 而目标光谱透射比的确定相当繁琐, 且准确度不高、可重复性差。针对宽光谱扫描法原理上的这种固有缺点, 采用薄膜设计和制造一体化的方法, 建立在蒸镀过程中及时拟合所镀

* 收稿日期 : 2005-07-04 ; 收到修改稿日期 : 2005-08-05
基金项目 : “十五”预研第一批兵器支撑基金项目(YJ0267051) ; 陕西省教育厅产业化项目(03JC28)
作者简介 : 韩军(1966-), 男, 西安电子科技大学博士研究生, 副教授, 从事光学薄膜技术研究。

膜层的厚度、折射率,并据此不断修正目标透射比,从而提高膜厚监控精度^[8]。

宽带监控自动判停依靠测量曲线和理论曲线的吻合程度来判断。对每一层膜,预先计算出整个光谱上的理论曲线,镀制时,实时扫描光谱并比较实测曲线和理论曲线的差异,当实测曲线和理论曲线吻合时停止镀制。在膜系镀制过程中,实测曲线和理论曲线吻合不好的主要原因在于,理论计算的光谱曲线没有考虑色散和吸收的影响,或者是使用的理论光学常数与实际光学常数存在较大差异。由于任何工艺环境上的变化最终都将影响膜料的光学常数,任何一台镀膜设备镀制的膜料光学常数和理论光学常数都存在不同程度的差异,最终使实测光谱曲线和理论光谱曲线相背离。

目前,国内一些学者通过对由于色散引起的实测曲线和理论曲线吻合不好进行了大量卓有成效的工作,使得宽带监控镀膜过程的准确度和可重复性都有了较大的改善^[8,9];但对由于吸收而引起的误差的补偿尚未见报道。

3 评价函数中吸收误差补偿

在宽带膜厚监控中,随着膜厚的增加,光的吸收对透射比的影响越来越大,使得实测光谱曲线会偏离标准光谱曲线。在膜料没有吸收时,反射比或透射比随膜层厚度的增加呈等幅震荡;当有吸收时,反射比或透射比曲线呈震荡收敛形状。分别取 $n = 2.3, k = 0$ 和 $n = 2.3, k = 0.01$,透射率随厚度变化曲线见图 1^[7]。

由图 1 可见,由于吸收的存在,随着膜层厚度的

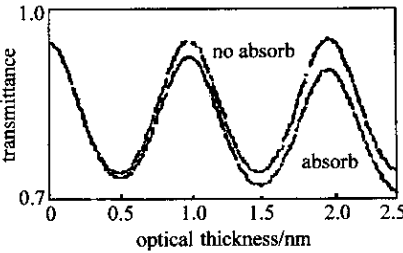


图 1 透射率随厚度变化曲线

$$T' = \frac{4\eta_0\eta_s}{(\eta_0B + C)(\eta_0B + C)^*}$$

$$= \frac{4\eta_s}{\frac{1}{2} \left[(1 + \eta_s)^2 - \left(\eta_1 + \frac{\eta_s}{\eta_1} \right)^2 \right] \cos(2\delta_1') + \frac{1}{2} \left[(1 + \eta_s)^2 + \left(\eta_1 + \frac{\eta_s}{\eta_1} \right)^2 \right] \operatorname{ch}(2\alpha_1) + (1 + \eta_s) \left(\eta_1 + \frac{\eta_s}{\eta_1} \right) \operatorname{sh}(2\alpha_1)} \quad (5)$$

式中 $\eta_0 = 1$ 为真空的光学导纳。

当 $\eta_1 = N_1 \cos \theta_1$ 时,所得 $T' = T'_s$,当 $\eta_1 = N_1 / \cos \theta_1$ 时,所得 $T' = T'_p$ 。由于 s 偏振波和 p 偏振波的能量相等,都等于入射光波能量的一半。因此,

$$T = \frac{4\eta_0\eta_s}{(\eta_0B + C)(\eta_0B + C)^*} = \frac{4\eta_s}{\frac{1}{2} \left[(1 + \eta_1)^2 - \left(\eta_1 + \frac{\eta_s}{\eta_1} \right)^2 \right] \cos(2\delta_1') + \frac{1}{2} \left[(1 + \eta_1)^2 + \left(\eta_1 + \frac{\eta_s}{\eta_1} \right)^2 \right] \operatorname{ch}(2\alpha_1)} \quad (6)$$

增加,将使理论计算值与实际值产生严重背离。因此为了使实时监控准确,在镀 $i + 1$ 层之前,必须对它的理论透射比因吸收而引起的误差进行补偿。

4.1 吸收影响实际透射比的理论模型

薄膜特性的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^m \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / \eta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 δ_j 为位相厚度,其表达式为 $\delta_j = 2\pi N_j d \cos \theta_j / \lambda$,其中 N_j 为膜层的折射率; η_j 为膜层的光学导纳,根据入射光在传播的过程中振动方向的不同可以分为 s 偏振和 p 偏振。当光波为 s 偏振波时 $\eta_j = N_j \cos \theta_j$,当光波为 p 偏振波时 $\eta_j = N_j / \cos \theta_j$, η_s 为基底光纳。此处,我们以单层膜为例推出膜层的吸收影响实际透射比的理论模型。

由于考虑了吸收,第一层膜的折射率为 $N_1 = n_1 - ik_2$,其位相厚度可表示为

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{2\pi N_1 d \cos \theta_1}{\lambda} \\ &= \frac{2\pi n_1 d \cos \theta_1}{\lambda} - i \frac{2\pi k_1 d \cos \theta_1}{\lambda} \\ &= \delta_1' - i\alpha_1 \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\delta_1' = \frac{2\pi n_1 d \cos \theta_1}{\lambda}$ 为无吸收时膜层的位相厚度; $\alpha_1 = \frac{2\pi k_1 d \cos \theta_1}{\lambda}$; k_1 为消光系数。

由式(1)算出 B, C ,并将(2)式代入,可得考虑吸收后的 B, C 的表达式如下

$$\begin{aligned} B &= \cos \delta_1 + i \frac{\eta_s}{\eta_1} \sin \delta_1 \\ &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\eta_s}{\eta_1} \right) e^{i\delta_1' + \alpha_1} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\eta_s}{\eta_1} \right) e^{-i\delta_1' - \alpha_1} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} C &= i\eta_1 \sin \delta_1 + \eta_s \cos \delta_1 \\ &= \frac{1}{2} (\eta_1 + \eta_s) e^{i\delta_1' + \alpha_1} - \frac{1}{2} (\eta_1 - \eta_s) e^{-i\delta_1' - \alpha_1} \end{aligned} \quad (4)$$

由式(1)、(3)和(4)可求出有吸收时膜层的透射比为

入射光的透射比为两束偏振波的迭加,即

$$T'_1 = \frac{1}{2} (T'_s + T'_p)$$

当不考虑吸收时,可以计算出膜层的理论透射比为

和有吸收时所得的透射比一样,无吸收时所得的透射比也为两束偏振波透射比 T_s 、 T_p 的迭加,即

$$T_1 = \frac{1}{2}(T_s + T_p)$$

比较 T'_1 和 T_1 ,由数学理论和光学薄膜原理可知 $\text{ch}(2\alpha_1) \geq 1, \text{sh}(2\alpha_1) \geq 0$ 。因此 $T'_1 < T_1$,即有吸收时膜层的透射比小于无吸收时膜层的透射比。当为双层膜时,在计算过程中将第一层膜和基底等效为一个复合基底,该等效复合基底的由下式计算

$$Y = \frac{C}{B} = \frac{\frac{1}{2}(\eta_1 + \eta_s)e^{i\delta_1 + \alpha_1} - \frac{1}{2}(\eta_1 - \eta_s)e^{-i\delta_1 - \alpha_1}}{\frac{1}{2}\left(1 + \frac{\eta_s}{\eta_1}\right)e^{i\delta_1 + \alpha_1} + \frac{1}{2}\left(1 - \frac{\eta_s}{\eta_1}\right)e^{-i\delta_1 - \alpha_1}}$$
$$= \frac{\cos\delta'_1(\eta_1\text{sh}\alpha_1 + \eta_s\text{ch}\alpha_1) + i\sin\delta'_1(\eta_1\text{ch}\alpha_1 + \eta_s\text{sh}\alpha_1)}{\sin\delta'_1\left(2\text{ch}\alpha_1 + \frac{\eta_s}{\eta_1}\text{sh}\alpha_1\right) + i\sin\delta'_1\left(\text{sh}\alpha_1 + \frac{\eta_s}{\eta_1}\text{ch}\alpha_1\right)}$$

(7)

有了此等效基底,则双层膜可看作是一个复合基底上的单层膜,光束透过玻璃基底上双层膜透射比的计算过程与在玻璃基底上单层膜的计算过程相同。此时式(1)中的 $\eta_s = Y$, Y 为复合基底光学导纳。以此类推,光束透过玻璃基底上 i 层膜透射比的计算则可将 $i - 1$ 层膜等效为一个复合基底,按照双层膜的计算过程进行。而在现有的多数薄膜设计软件中,往往将介质作为弱吸收材料,忽略了吸收的影响,求得的是理想透射比,因此在采用评价函数进行膜厚监控的过程中,由于实际材料的吸收会引起透射比的监控误差。为了提高监控精度,可以采用多种方法根据上述关系对吸收引起的透射比误差进行补偿。

4.2 吸收影响实际透射比的补偿

在实际镀膜过程中,随着所镀膜层数的增加,吸收对透射比的影响越来越大^[7,8]。由能量守恒定律:当不考虑吸收时, $\hat{T} + \hat{R} = 1$;当实际考虑吸收时, $T + R + A = 1$ ^[10]。 $\hat{T}$ 为理论透射比, $\hat{R}$ 为理论反射比, T 为实际透射比, R 为实际反射比, A 为膜层的吸收率。

当膜层从无吸收变为有吸收时,膜层的折射率从 $N = n$ 变为 $N = n - ik$, k 为膜层的消光系数。此时影响了膜层的透射比^[11]。但是由于大多数的电介质材料可以被看成是弱吸收材料,(它们的消光系数 k 相对于 n 小得多)。因此可以认为:膜层的折射率从 $N = n$ 变为 $N = n - ik$ 时,系统在介质分界面上的透射比基本不受影响;系统的宏观透射比偏差主要是由于光波在弱吸收介质中传播时能量(或振幅)衰减而引起的;这种衰减可以用布格尔

(Bouguer)定律来描述,即按照光波在其中传播的距离成指数下降。

为此,在实际通过透射比监控的过程中,为了消除由于材料的弱吸收产生的累积误差,可以近似认为:镀完每层膜时,理论透射比 T' 与实际透射比 T 的宏观差别只是由于光波在弱吸收介质中的传播引起的,即 $\hat{T} - T = A'$ 。而 T' 在镀某层膜之前是已知的, T 可以通过实际测量得到。这样,当镀完第一层膜时,可求得其吸收率 $T'_1 - T_1 = A'_1$ 。在镀第二层膜之前,由于第一层膜的吸收将会影响该层膜的监控准确性,因此需要补偿掉此吸收的影响。而第二层膜的初始理论透射比 T'_2 已知,采用 $T'_2 - A'_1 = T''_2$,修正第一层膜的吸收对第二层膜的监控影响,得到的 T''_2 作为监控第二层膜的理论透射比。以此类推,在镀第 i 层膜之前,需补偿掉层膜吸收引起的累积误差,采用 $T'_i - A'_{i-1} = T''_i$ 进行修正,得到 T''_i 作为监控第 i 层膜的理论透射比。则可根据评价函数来监控整个镀膜过程。具体过程如图 2 所示。

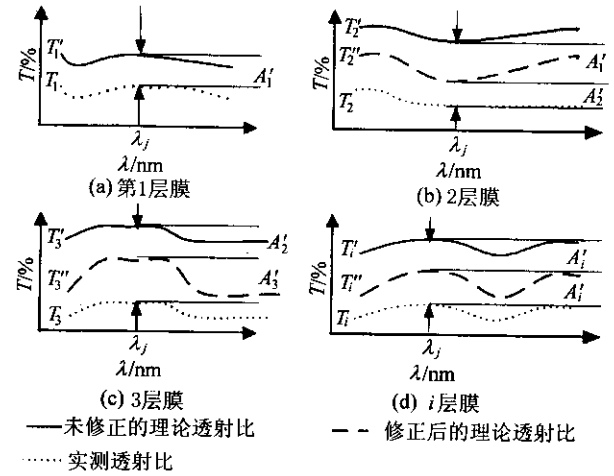


图 2 膜层吸收补偿示意图

图中 T'_i 为理论透射比, T_i 为实测透射比, T''_i 为修正后的理论透射比, A'_i 为 i 层膜产生的吸收率。

由于吸收具有波长选择性,对不同波长的吸收率是不同的,所以在宽光谱监控中应特别注意对所选每一个监控波长进行理论透射比的修正。

5 实验及分析

在 K9 玻璃上镀单层 TiO_2 薄膜,理论透射比,测得的实际透射比,以及理论透射比与实际透射比的误差曲线如图 3 所示。

由图可见,在 400~800nm 波段内每个波长点上的吸收并不一样(这主要是由材料的色散所引起的),其变化范围在 4.27%~24.53% 之间,但在 470nm~

(下转第 678 页)

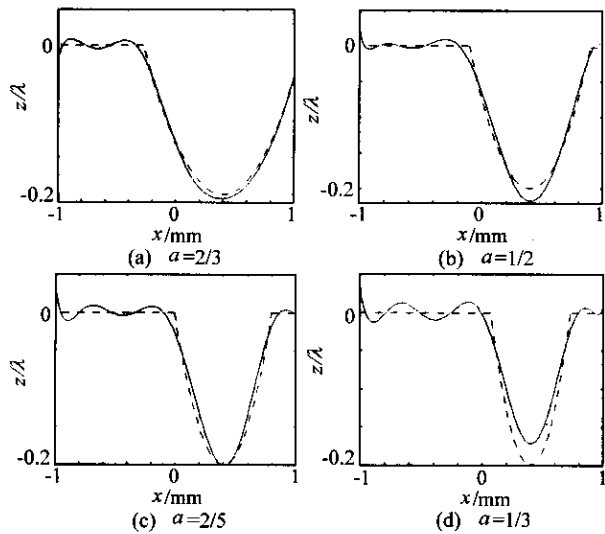


图 7 局部误差二维图形

(1) 利用有限项 Zernike 多项式拟合径向误差时,受到最大空间频率的限制,当波前误差的径向空间频率超出某一值时,拟合误差迅速正大,例如,37 项 Zernike 多项式的最大径向空间频率约为 2 (周期/半径)。如果扩展空间频率范围,则必须增加 Zernike 多项式径向 ρ 的阶数。

(2) Zernike 多项式拟合局部误差受局部误差口径大小的限制,并且会带来附加的波动。由于局部误差沿着两个方向变化,要提高 Zernike 多项式

表达局部误差的能力,则必须增加径向 ρ 和幅角 θ 的阶数。为了避免沿幅角方向变化的误差引起的拟合精度的下降,幅角的阶数与径向的阶数要匹配。

总之,在利用有限项 Zernike 多项式进行波面误差拟合时要注意 Zernike 多项式适用的条件,根据不同情况选择 Zernike 多项式项数,例如,是要拟合低频误差还是中频误差,拟合波面的形状是圆形还是其它形状等。

参考文献：

[1] Wyant J C. Basic wavefront aberration theory for optical metrology [J]. Applied Optics and Optical Engineering. 1992, XI 27—38.

[2] Figoski J W, Shrode T E. Computer-aided alignment of a wide-field, three-mirror, unobscured, high-resolution sensor [J]. Proc SPIE, 1989,1049 :166—175.

[3] 鄢静丹,雷凡,周必方,等. 用 Zernike 多项式进行波面拟合的几种算法[J]. 光学 精密工程,1999,7(5) :119—128.

[4] 单宝忠,王淑岩,牛憨笨. Zernike 多项式拟合方法及应用[J]. 光学 精密工程,2002,10(3) :313—328.

[5] Code V Online Reference Manual. Version 9.0 :2A-505

[6] 鄢静丹,孙厚环,高志强,等. 用 Zernike 多项式进行波面拟合的一种新算法[J]. 数学物理学报,2000,20(3) :378—385.

[7] 鄢静丹,雷凡,周必方,等. 用 Zernike 多项式进行波面拟合的几种算法[J]. 光学 精密工程,1999,7(5) :119—128.

[8] 魏学业,俞信. 一种基于 Zernike 多项式的波前探测和重构方法[J]. 光学学报,1994,14(7) :719—723.

(上接第 674 页)

800nm 之间的变化并不大,其范围为 6.29% ~ 10.67%。由薄膜原理可知,膜系的吸收是随着膜层厚度的

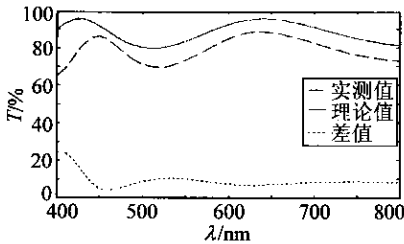


图 3 单层 TiO₂ 薄膜透射比比较曲线

增加而增加的,当镀第二层膜的时候,如果按理想的理论设计透射比作为镀膜标准,势必要增加膜层的吸收,如果根据所镀膜层的吸收情况重新设计下层膜的理论透射比,从而消除由于前面膜层的吸收而引起的误差,可大大提高膜厚的监控精度。

6 结 论

实验证明,采用上述方法对目标光谱透射比曲线进行逐层修正后,薄膜厚度监控误差可以达到 10^{-3} 以下,精度完全可以满足实际要求。

参考文献：

[1] Pulker H K. Coatings on Glass[C]. Eisevier, Amsterdam-Oxford New York-Tokyo, 1984. 306—307.

[2] Vidal B, et al. Wideband Optical monitoring of nonquarterwave multilayer filters[J]. Appl Opt, 1979,18(22) :3851.

[3] 蔡旭阳,孙大雄,菊池和夫. 一种新型多功能快速分光式膜厚仪[J]. 光学仪器,1999,21(4.5) :110—113.

[4] Telemark Co. Ltd. Model Om820 in-situ spectroscopic optical monitor User's guide[R]. Telemark Co., 2000.

[5] Sainty W G, Sainty D W. Multiwavelength monitoring of thin film growth using a fiber spectrometer[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4094 :31—37.

[6] 顾培夫. 薄膜技术[M]. 浙江 浙江大学出版社,1990.

[7] 张诚,卢维强,王涌天. 基于宽光谱监控的光学薄膜自动控制技术[J]. 光子学报,2004,33(9) :1136—1139.

[8] 刘晓元,黄云,周宁平,等. 光学镀膜宽带膜厚监控系统[J]. 国防科技大学学报,2001,23(1) :23—27.

[9] Wu P Y, Gu P F. Wideband monitoring of optic coatings with deposition error correction[J]. SPIE,1993,2000 :121—132.

[10] Macleod H A. Absorption in turning value monitoring of narrow-band thin-film optical filters[J]. OPTICA ACTA, 1973,20(7) :493—505.

[11] 林永昌,卢维强. 光学薄膜原理[M]. 北京 国防工业出版社,1990.