

文章编号: 1001-2486 (2001) 01-0023-05

光学镀膜宽带膜厚监控系统*

刘晓元, 黄 云, 周宁平, 龙兴武

(国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对过去的宽带膜厚监控法必须依赖镀制前设定的目标透射率(反射率)的固有缺陷, 提出了在蒸镀过程中及时拟合出所镀层的膜厚、色散系数(折射率)等参数, 并据此不断修正目标透射率(反射率)的设想, 从而从根本上克服过去的宽带膜厚监控法的固有缺陷。建立了基于修正膜层目标光谱特性的宽带膜厚监控系统, 阐述了它的结构和工作原理。进行了稳定性实验及一系列镀膜监控实验, 实验结果表明, 该系统透射率的重复测量精度优于 2‰, 膜厚监控精度较高, 重复性好, 各层的终点膜厚判定精度优于 1%。

关键词: 光学薄膜; 镀膜; 膜厚监控; 宽带膜厚监控

中图分类号: TB43 **文献标识码:** A

The System of the Wideband Monitoring of Optical Film Thickness

LIU Xiao-yuan, HUANG Yun, ZHOU Ning-ping, LONG Xing-wu

(College of Science, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Because the target transmissivity (reflectivity) must be determined in advance in any conventional wideband monitoring of optical film thickness, this paper puts forward an imagination of mapping out parameters of film thickness and dispersive coefficients (refractive index) and continuously modifying target transmissivity in a coating time, by which the defect of the conventional wideband monitoring of optical film thickness can be overcome. The system of wideband monitoring of optical film thickness based on modifying target transmissivity has been built up. Its construction and working theory have been discussed. The accuracy of transmissivity measured by the system is higher than 2‰. A series of experiments of monitoring film thickness have been accomplished. It has shown that the accuracy of monitoring by the system is higher, the repeatability is better, and the accuracy of judging the end of coating is higher than 1%.

Key words: optical film; coating; thickness monitoring; wideband monitoring of optical film thickness

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。对于四分之一波长的光学薄膜来说, 目前用的最多的是监控单一波长的极值法, 但由于在极值点附近透射率(反射率)的变化缓慢, 极值法的监控精度并不高^[1]。而宽带扫描法^[2-4]主要用于监控任意膜厚的膜系, 但宽带扫描法自 20 世纪 70 年代末提出以来, 在膜厚监控精度上没有实质性的提高^[5-8], 并未得到广泛应用, 这主要是与它的原理密不可分。在原理上, 该方法完全依赖事先设定的膜层的目标透射率 T (或反射率 R), 这就需要对每一批材料事先进大量的实验, 以找出各种条件下的膜层的折射率特性, 不仅十分繁杂, 而且不一定有效。这对于 ZnS、MgF₂ 之类的折射率比较稳定的材料来说, 也许可行; 但对于薄膜性能严重依赖蒸镀条件的材料来说, 目标透射率很难找准, 从而判断不可能准确, 重复性不可能好。本文提出在蒸镀过程中及时地拟合出所镀层的色散及折射率, 据此计算出目标透射率 $T_j(\lambda, D_i)$, 从而不断对它修正, 以达到准确判断; 同时在蒸镀结束后根据已镀层的折射率和膜厚, 设定下一层的光学厚度, 消除前面各层的误差影响, 避免误差的积累。这就从根本上克服了过去的宽带膜厚监控技术原理上的固有缺陷, 使之不依赖事先设定的目标透射率, 而是根据不同蒸镀条件下已经蒸镀的膜层来决定目标透射率, 极大地提高了膜厚监控精度。

* 收稿日期: 2000-09-25

基金项目: 国家部委项目资助(97J9.1.4. KG0134)

作者简介: 刘晓元(1967-), 男, 博士生。

1 宽带膜厚监控原理

设待镀光学膜第 j 层的目标光谱透射率曲线为 $T_j(\lambda, D_i)$, 在镀制过程中的实际透射率曲线为 $T_j(\lambda, D)$, 定义评价函数为:

$$f_j = ((\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |T_j(\lambda, D_i) - T_j(\lambda, D)|^2 d\lambda)(\lambda_2 - \lambda_1))^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

我们只须在镀制中不断计算出评价函数, 当它为零时就停止蒸镀。理论上评价函数的极小值为零, 但实际上它的极小值不为零, 总比零大, 这主要是由探测器各像元随机起伏的噪声和计算目标透射率的色散系数(折射率)与最终的色散系数(折射率)的差别引起的, 当进行实时拟合后, 后者的影响几乎不存在。

2 实时修正目标透射率的宽带膜厚监控系统的结构

该膜厚监控系统的结构如图 1 所示, 采用 WQD20-1 光栅多色仪为分光元件, TCD1206UD 线阵 CCD 接收光谱信号, 用 12 位数据采集卡对 CCD 的信号进行采集, 一台计算机用于实时数据采集及快速处理与显示, 另一台计算机专门拟合膜层的色散系数(折射率)和膜厚, 两台计算机之间用高速通讯适配器快速完成数据传送。

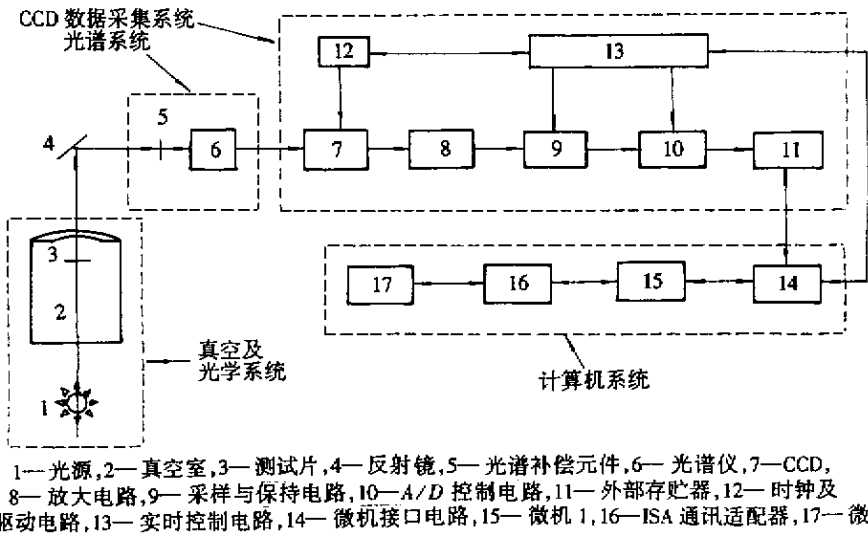


图 1 宽带膜厚监控系统的结构

Fig.1 The constitution of wideband monitoring of optical film thickness

3 实时修正目标透射率的宽带膜厚监控系统的工作流程

将 CCD 的每一像元接收到的光谱信息转换成数字量, 送入计算机 1, 经处理后求得实际透射率, 再与目标透射率相比较求出评价函数, 当评价函数达到极小值时, 停止蒸发和采集; 否则, 将实际透射率传送至计算机 2, 由计算机 2 拟合所镀膜层的实际折射率和膜厚, 从而重新求出目标透射率, 将其传送至计算机 1, 继续采集。上述过程不断循环, 直至评价函数达到极小值。实际工作流程如图 2。下面重点阐述色散系数和厚度的拟合方法及拟合精度。

用最小二乘法⁹拟合色散系数和膜厚, 其计算框图如下:

(1) 设 $b = (A, B, D)^T$, $\Delta_j = b_j - b_j^{(j)}$ ($j = 1, 2, 3$), b 是 $Q = \sum_{i=1}^m [T_i[i] - \pi(b, \lambda_i)]^2$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 的一个极小点, 式中 T_F 、 T 分别为实际透射率和待拟合的理论透射率。

(2) 给出初始值 $A^{(0)}, B^{(0)}, D^{(0)}$ 及容许误差 E_A, E_B, E_D 。

(3) 调入实际透射率 $T_F [i] (i = 1, 2, \dots, m)$ ，并置 $J = 0$ 。

(4) 计算偏导数 $\partial T / \partial b_j$ 及 g_j 。

(5) 解线性方程组： $(A^{(J)T}A^{(J)} + r^{(J)}I) \Delta^{(J)} = -g^{(J)}$ ，式中 $r^{(J)}$ 为阻尼因子，一般取 0.1， I 为单位矩阵。

(6) 计算 $b^{(J+1)} = b^{(J)} + \Delta^{(J)} / S$ ， S 为步长因子，为保证迭代时不易发散， S 取 5~10 比较适合。

(7) 如果 $\|\Delta_1^{(J)}\| < E_A, \|\Delta_2^{(J)}\| < E_B, \|\Delta_3^{(J)}\| < E_D$ ，则停止迭代，转入下步，否则 $J = J + 1$ ，转入 (4) 继续迭代；若当 $J = 5000$ 时，仍不满足前面的条件，认为此次拟合失败，并置 $\Delta^{(J)} = (0, 0, \Delta D)$ ，转入下步， ΔD 为根据蒸镀速率确定的膜厚调整量。

(8) 取 $b^{(0)} = b^{(J)} + \Delta^{(J)}$ 转入 (3) 进行下一次拟合。

在实际拟合的过程中，根据所镀材料特性设置初始值 $A^{(0)}, B^{(0)}$ ，由于刚开始蒸镀时的光谱特性不明显，蒸镀上 5 nm 后开始拟合最为适宜。容许误差取 $E_A = 0.0005, E_B = 0.00017 \mu\text{m}^2, E_D = 0.00001 \mu\text{m}$ ，一般迭代数十次即可达到要求。用 P_{III} 微机一般在 100 ms 内即可完成一次拟合。

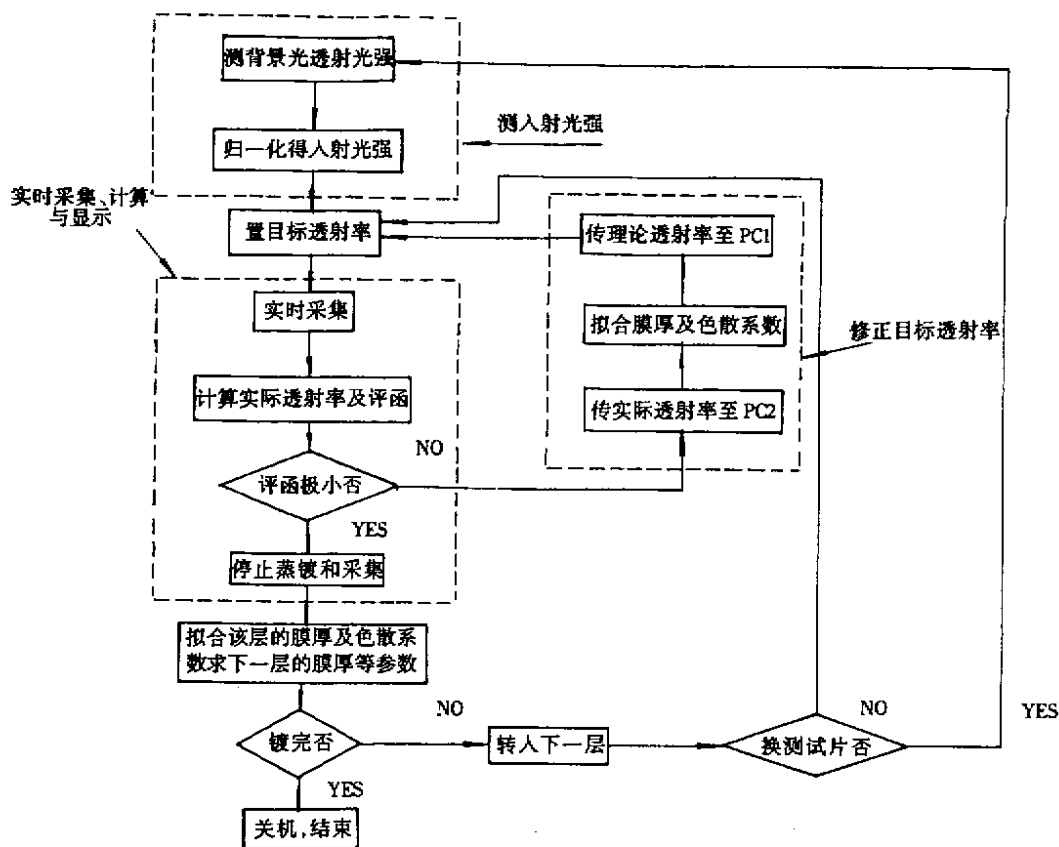


图 2 宽带膜厚监控系统的工作流程

Fig.2 Working procedure of wideband monitoring of optical film thickness

4 镀膜监控实验及精度分析

实际镀膜过程中，真空度、温度、光源及电源等均可能有变化，这些参数的变化，一是可能引起透射光的变化，从而引起 CCD 采集的信号误差；二是直接引起 CCD 的某些性能的改变，如温度的变化将直接引起 CCD 的暗电流的变化，从而也引起 CCD 采集的信号误差。在本监控系统中，又是

以开始镀膜时采集的测试片的透射光求得的入射光作为整个监控过程的基础，因而须首先测试入射光的稳定性，这里以未镀膜的测试片的透射率为测试对象。由于随着镀膜层数的增加，透射光的幅度越来越小，相应的 CCD 的像敏元产生的光电子数将减少，CCD 的信噪比有可能变差，故也须测量透射光幅度变小时系统的稳定性，这里以 3 层四分之一波长的介质膜的透射率为测试对象。测试方法：每 20 分钟采集一次，共计 6 次。测试结果：在 2 小时内，在整个监控波段，透射率基本保持不变，6 次测量值的均方差的最大值为 0.3%，平均值 0.15%。

进行了该系统的膜厚监控重复性实验，分别监控了 3、5、11、15 层 TiO_2 、 SiO_2 四分之一波长膜系，用分光光度计测得的透射率如图 3 至图 6 所示。图 3 为 3 层膜的透射率曲线，透射率的最大偏差为 1.0%，平均偏差为 0.3%。图 4 为 5 层 TiO_2 、 SiO_2 膜的透射率曲线，峰位一致性好，第一次的极小点在 744 nm 处，极大点在 576 nm 处，第二次的分别为 748 nm、580 nm，二者的峰位差仅为 4 nm。图 5 为 11 层膜的透射率曲线（用 3 个测试片镀制，控制波长均为 662.8 nm），两次峰位的一致性很好，如表 1 左半部所示，中心波长相差仅 3.1 nm。图 6 为 15 层膜的透射率曲线（用 4 个测试片镀制，控制波长为 750.0 nm），两次峰位的一致性很好，如表 1 右半部所示，中心波长相差仅 1.8 nm。

镀制的膜片质量的好坏很大程度上取决于每一层膜的终点判断精度，以镀制 15 层（750 nm/4） TiO_2 、 SiO_2 高反膜时的有关拟合数据为依据，每层的中心波长与平均波长的最大偏差为 1.2%，平均偏差为 0.7%，这也是该系统的膜厚监控精度。11 层和 15 层膜的各自峰位和中心波长的极高的重复性，也证实了该系统的膜厚监控精度是很高的。

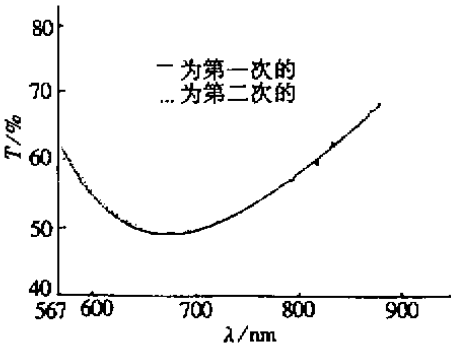


图 3 第一次和第二次镀制的 3 层膜的透射率曲线
Fig.3 Transmissivity measured of film with 3 layers

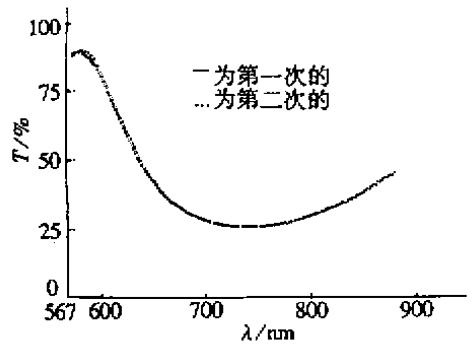


图 4 第一次和第二次镀制的 5 层膜的透射率曲线
Fig.4 Transmissivity measured of film with 5 layers

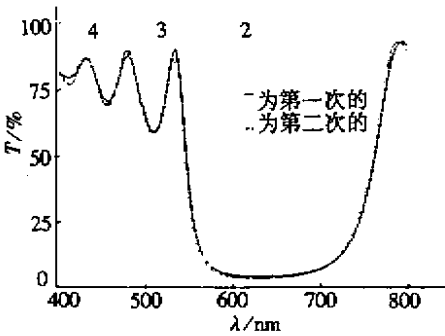


图 5 第一次和第二次镀制的 11 层膜的透射率曲线
Fig.5 Transmissivity measured of film with 11 layers

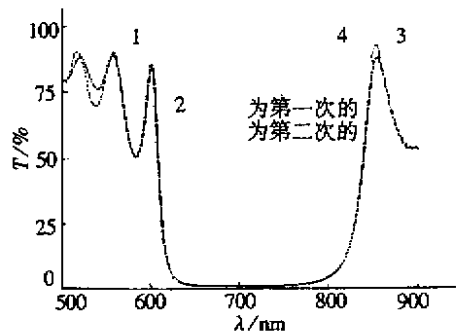


图 6 第一次和第二次镀制的 15 层膜的透射率曲线
Fig.6 Transmissivity measured of film with 15 layers

表 1 11 及 15 层高反膜的峰位和中心波长
Tab.1 Peak and central wavelength of films with 11 & 15 layers 单位：nm

镀制 次别	峰位 1	峰位 2	峰位 3	峰位 4	中心 波长	峰位 1	峰位 2	峰位 3	峰位 4	峰位 5	中心 波长
1	796.25	536.25	483.25	435.25	640.9	857.25	602.25	558.75	521.5	485.5	707.4
2	791	534.25	483.25	435.75	637.8	855.75	600.25	558.5	518.0	482.0	705.6
差值	5.75	2.0	0	0.5	3.1	1.5	2.0	0.25	3.5	3.5	1.8

5 结论

以光栅光谱仪、CCD 及其数据采集系统、计算机及通讯适配器等为基础，建立了基于修正目标透射率的宽带膜厚监控系统。该系统透射率的重复测量精度优于千分之二。用该系统进行的一系列镀膜监控实验表明，系统的膜厚监控重复性好，终点膜厚判断精度优于百分之一。上述监控系统及实验表明，在镀膜过程中根据膜层的透射光谱曲线实时拟合出色散系数（折射率）和膜厚，并据此不断修正目标透射率是可行和有效的，为提高宽带膜厚监控法的监控精度和该技术的推广应用奠定了基础。

参考文献：

- [1] 顾培夫. 薄膜技术 [M]. 杭州：浙江大学出版社，1990.
- [2] Vidal B , Fomier A , Pelletier E. Optical Monitoring of Nonquarterwave Multilayer Filters [J]. Appl. Opt , 1978 , 17 (7) : 1038 - 1047 .
- [3] Vidal B , Fomier A , Pelletier E. Wideband Optical Monitoring of Nonquarterwave Multilayer Filters [J]. Appl. Opt , 1979 , 18 (22/15) : 3851 - 3856 .
- [4] Vidal B , Fomier A. Nonquarterwave Multilayer Filters : Optical Monitoring with a Minicomputer Allowing Correction of Thickness Errors [J]. Appl. Opt , 1979 , 18 (22/15) : 3857 - 3862 .
- [5] Van der Laan C J. Optical Monitoring of Nonquarterwave Stacks [J]. Appl. Opt , 1986 , 25 (5/1) : 753 - 760 .
- [6] Powell I , Zwinkels J C M , Robertson A R. Development of Optical Monitor for Control of Thin Film Deposition [J]. Appl. Opt , 1986 , 25 (20/15) : 3645 - 3652 .
- [7] 杨本棋等. 光学薄膜的宽带膜厚监控装置 [J]. 光学学报，1987.
- [8] Li Li , Yen Yi - hsun. Wideband Monitoring and Measuring System for Optical Coatings [J]. Appl. Opt , 1989 , 28 (14/15) : 2889 - 2894 .
- [9] 刘钦圣. 最小二乘问题计算方法 [M]. 北京：北京工业大学出版社，1989.

