

光学薄膜的宽带膜厚监控装置

杨本祺 许绍基 金林法 章宏芬 金洪厚

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

装置是由配有微机的快速扫描分光光度计组成,在镀膜时不断测量膜层的光谱透射率曲线以监控膜厚,并作了监控三层膜的试验。

装置的性能:测量波长宽度 333 nm; 波长点数: 50 点; 透射率精度: $\pm 1\%$; 光谱透射率扫描速度: 120/s。

关键词: 光学薄膜。

一、引 言

在制备各类光学薄膜时,要获得设计要求的光谱性能,选择适当的膜厚监控方法是很重要的,现有的各种光学监控方法如极值法,波长调制法,绝对测量法等等,都是通过测量薄膜的某一特定波长(或在甚小的波段范围内)的光学性能来监控膜厚,因而这些方法都不能了解监控时的膜系光谱性能。对有光谱要求的宽带膜来说,应该考虑通过测量膜的宽光谱性能来监控膜厚。有人曾用计算机模拟监控过程中可能出现的误差影响,论述了宽带法比单一波长的监控法为好^[1],之后,广泛进行了这种宽带法监控研究工作^[2~5],但作为监控装置尚不多见,且性能也不够满意,如日本 Showa Shinku 公司的多色光学监控仪 SOM-300,在可见光波段,采样 13 波点,而测量光谱反射率的时间较慢(2 sec)。

其次,若膜系需要具有优良的光谱性能,则膜厚度往往设计成非 $\lambda/4$ 厚,就难于监控。而宽带法是在镀膜过程中不断地测量光谱性能,并与设计要求相比较,以是否吻合为标准,因此可监控任意膜厚。

此外,宽带法能实时显示膜系的光谱透射率曲线,从而可以得到一般不易发现的有用信息,如果进一步能提高测量精度,计算速度足够快,那末就有可能从测得的光谱透射率曲线,推算出膜层在真空中的折射率和厚度,从而有可能修正下一层的膜厚,以获得理想的结果。

二、宽带法膜厚监控原理

当制备多层膜的第 i 层时,其透射率 T_i 不但与该层膜的折射率 n_i , 膜厚 e_i 及所测定的波长 λ 有关,而且与第一层到 $i-1$ 层膜的折射率和厚度有关,但在第 i 层镀制过程中,如果膜层的折射率是稳定的,则 T_i 仅与波长 λ 及膜厚 e_i 有关,即 $T_i = T_i(\lambda, e_i)$, 若 i 层膜厚的设计要求为 e_i , 则达到要求时的透射率为 $T_{oi} = T_i(\lambda, e_i)$, 于是在波段 λ_1 和 λ_2 之间,膜厚 e_i 与

ϵ_i 的二条光谱透射率曲线的差距可写成

$$f_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |T_i(\lambda, \epsilon_i) - T_i(\lambda, \epsilon)| d\lambda, \quad (1)$$

式中 f_i 称为 i 层的评价函数。在涂膜过程中, 当 ϵ 逐渐接近 ϵ_i , 则 f_i 逐渐减少而达极小值*。因此实验时只要监控 f_i 的极小值, 就监控了膜厚。

三、监控装置的工作原理及其结构

装置中采用了光学多道分析技术, 由计算机自动检测及快速数据处理, 其结构如图 1 所示。

由点光源灯泡发出的光, 经镀膜室内的监控玻璃, 入射到多色仪的狭缝上, 分光后, 使被测波段的光, 落在光电二极管阵列上, 则每一光电二极管接收相应波长的光强, 转变成电讯号, 经放大, A/D 变换成数字量, 经接口存入计算机, 即得透射光强 I_2 。若移去监控玻璃, 同样, 可得入射光强 I_1 , 则对波长 λ_j , 可计算出监控玻璃的透射率为

$$T_j = \left(\frac{I_2 - I_0}{I_1 - I_0} \right)_j, \quad (2)$$

式中, I_0 为暗流, 若波长点数为 50, 则可测出 50 个波长的透射率 T_j , 经接口由 D/A 变换器, 在示波器上实时显示了透射率曲线。将此 T_j 值与设计的相应透射率 T_{0j} 比较, 得出评价函数 f , 则

$$f = \sum_{j=1}^{50} |T_{0j} - T_j| \omega_j, \quad (3)$$

式中 ω_j 为相应波长的权重。在镀膜过程中, 不断地显示 f 值, 并衡量 f 值, 当达到极小值时, 计算机发出指令, 切断电子束蒸发器电源, 停止蒸发, 这样就监控膜厚达到所要求的厚度。

装置的结构, 包括快速扫描光谱透射率测量系统和数据处理监控系统。

在测量系统中, 为了获得稳定的光强, 点光源灯泡采用交流稳压器经直流稳压器供电。电压稳定度高于 1.5×10^{-4} , 多色仪为 WDG 30 光栅单色仪改装, 卸去出射狭缝, 改聚焦镜的焦距为 350 mm, 选用 120 l/mm 一级闪耀光栅, 闪耀波长为 5000 Å, 当入射狭缝为 0.08 nm 时, 单色性为 20 Å, 接收器为 RL-1024S 光电二极管阵列, 有 1024 单元, 每单元面积为 $25 \mu\text{m} \times 2.5 \text{mm}$, 间距 25 μm , 灵敏度 $2.8 \times 10^{-4} \text{ coul/J/cm}^2$, 光谱响应范围 0.2~1.1 μm ,

* 其理论值为 0。

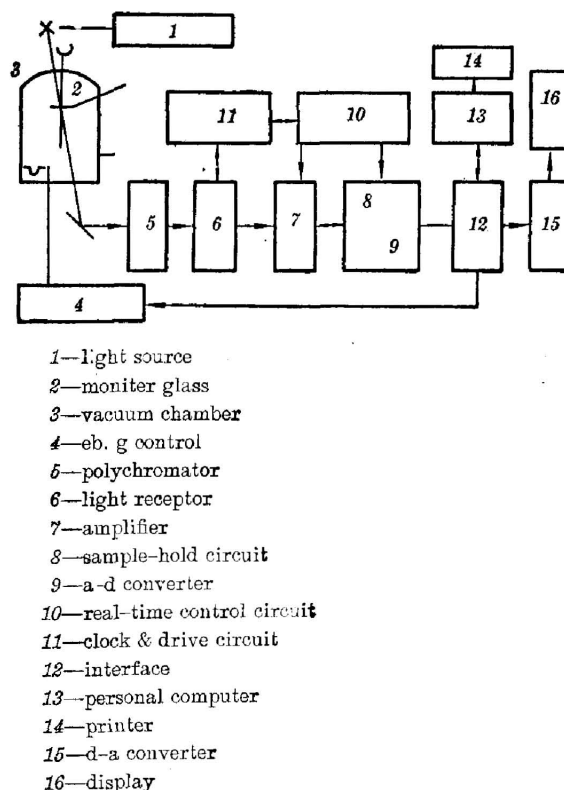


Fig. 1 Schematic diagram of the apparatus configuration

为了快速扫描,采用高速8位A/D变换器,变换速度为50万c/s,为了与高速A/D变换器相配,为微机设计了专用的接口,该接口由1K字节的高速RAM组成缓存器。

在数据处理和监控系统中,用TRS-80I型微机处理数据,为显示实测光谱透射率曲线和设计的光谱透射率曲线,采用了两个缓冲存储器组成了D/A变换器与计算机的接口,另外还设计了一个控制室发源的接口和控制电路。

四、监控装制的性能

1. 透射率的测量精度

根据膜厚监控精度的要求,透射率精度应不低于1%,故采用8位的A/D变换器和微机,并采用了动态范围比较大的光电二极管阵列,前置放大为低噪声放大器,信噪比达50dB以上,采样电路采用了自相关采样技术,以抑制开关瞬态尖峰脉冲,电路中采取多次滤波,地线分隔等增强抗干扰措施,获得了透射率精度为 $\pm 1\%$,并在15分钟内,重复测量,透射率的平均偏差为 $\pm 0.5\%$ 。

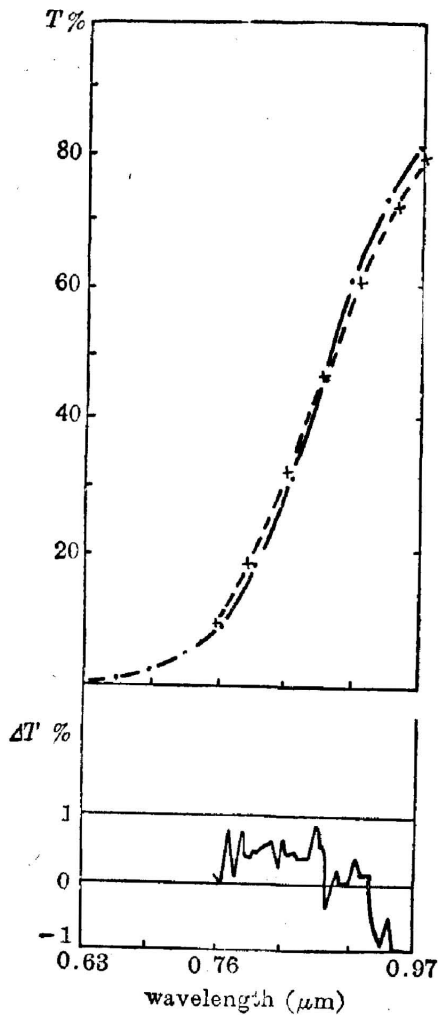


Fig. 2 Transmittance vs wavelength for the colour glass

为了检验透射率精度,选用一块在被测波段有不同透射率的有色玻璃,在监控装置中测量其光谱透射率,其结果如图2所示,并与Perkin-Elmer公司的Lambda 9分光光度计测量的光谱透射率曲线(波长读数精度 4\AA)相比较,平均偏差 $< \pm 1\%$ 。

2. 波段带宽

RL-1024S接收器的响应波段比较宽,为了实现快速扫描,实验能够选用带宽仅333nm。根据通常膜系要求,选用波段为637nm到970nm。在多色仪中,经光栅色散系统后,它在接收器中所占长度如何?由光栅光程

$$d(\sin \theta - \sin \psi) = m\lambda, \quad (4)$$

式中, d 为栅距[(1/120)mm], θ 为入射角(12°), ψ 为衍射角, m 为光谱级数, λ 为波长,计算得该波段在接收器上所占的长度为14.5mm,而现用的阵列长度为25.4mm,故带宽是足以满足要求的。

3. 测量的波长点数,间隔及分辨率

增加测量的波点数,将会提高监控的精度,但要求有足够快的计算速度以保证一定的光谱扫描速度,这样就需要适当的选择,一般,宽带膜的光谱透射率曲线,没有很尖锐的峰或谷,故在波段中每隔

60\AA 左右取一采样测量点,是可以满足要求的,此外,再选择比较大的波点增加权重,以提

高监控灵敏度,本实验选用了 50 个波点。

列阵的每单元宽度为 $25\mu\text{m}$,从多色仪可以计算 $25\mu\text{m}$ 所占的光谱宽度为 5.8\AA ,并用钨光谱灯实测,谱线 7800.23\AA 及 7947.6\AA 的间隔占列阵 26 个单元,每单元占光谱宽度为 5.668\AA ,即为其分辨率,现选用 50 个波点,每波点间隔为 12 个单元,即 68\AA 。

在实际使用中,考虑到接收器的响应,使多色仪的入射狭缝 $\leq 0.08\text{mm}$,则使光谱单色性变差,由光栅方程,可得角色散。

$$\frac{d\psi}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \psi} \quad (5)$$

则当入射狭缝 $a_1 = 0.08\text{mm}$ 时

$$\Delta\lambda = \frac{d\lambda}{d\psi} \left(\frac{a_1}{f_1} + \frac{a_2}{f_2} \right) \approx 20\text{\AA}, \quad (6)$$

式中, f_1 、 f_2 为准直镜及聚焦镜的焦距, a_2 为列阵单元的宽度。

4. 测量光谱透射率的速度

一般,沉积一层膜的时间 $\geq 50\text{sec}$,故若测量整个波段的透射率的时间,或称光谱扫描速度,选为 0.5sec ,即 2c/s ,则将会引起 1% 的膜厚误差,故光谱扫描速度宜大于 2c/s ,为此在监控时采用汇编语言,尽量节省时间,并用无符号整数运算,测得计算机发指令采样的时间间隔小于 80ms ,由此可见,即大于 12c/s 。

5. 装置的功能

装置的操作程序可以选择自动监控或快速测量膜层的光谱透射率,在自动监控时,不断地显示评价函数 f ,实时显示膜层的光谱透射率曲线和设计的光谱透射率曲线,当观察到评价函数 f 值(或光谱透射率曲线),认为已经满意时,即按键停止蒸发,打印出各类数据,然后再根据需要,继续涂完这层膜或涂下一层膜等。

五、监控实验

设计三层非 $\lambda/4$ 膜厚的分光膜,各层膜料为 ZnS , MgF_2 , ZnS ,基片为 K_9 玻璃,膜厚依次为 53nm , 130nm 和 117nm ,考虑了色散,其光谱透射率如图 3~5 所示,每层的监控结果,亦示于图中,监控膜层的光谱透射率符合设计的光谱透射率,平均偏差小于 0.5%,个别波长的最大绝对偏差小于 1.2%。

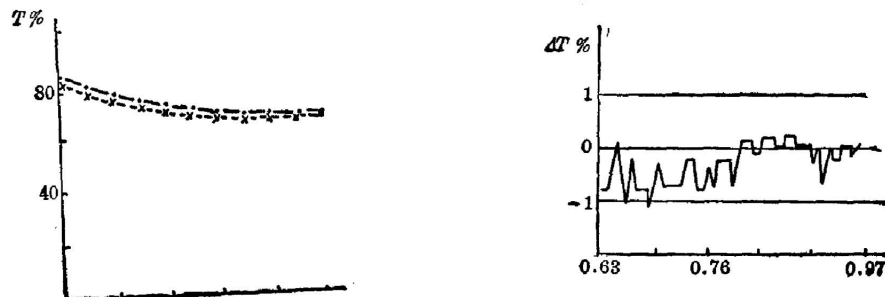


Fig. 3 Transmittance vs wavelength (after termination of the first layer deposition on a beam splitter)

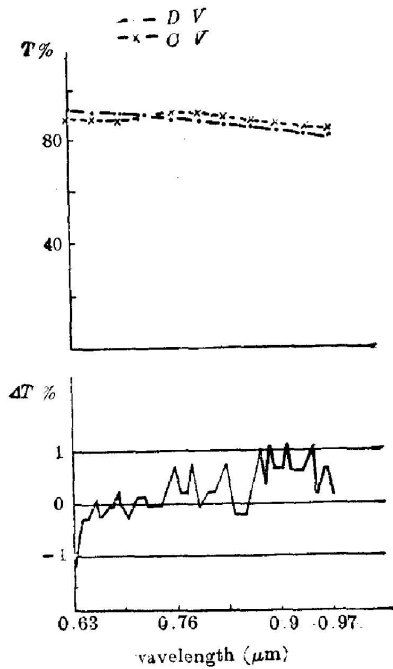


Fig. 4 Transmittance vs wavelength (after termination of the 2nd layer deposition on a beam splitter)

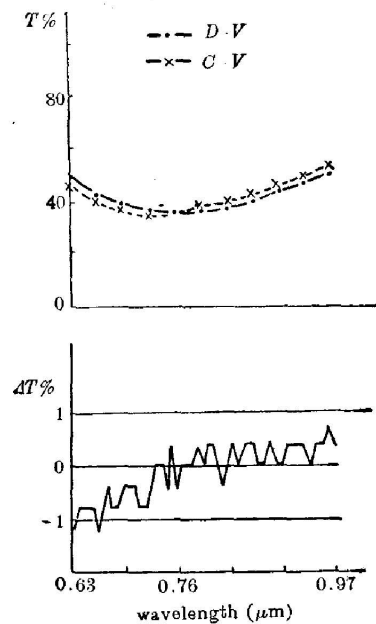


Fig. 5 Transmittance vs wavelength (after termination of the 3rd layer deposition on a beam splitter)

六、结 束 语

宽带监控装置能监控非膜系,尤其是监控宽带膜,监控稳定,重复性好。装置是在膜层沉积过程中快速、实时测量薄膜的光谱透射率,从而可以定性了解镀膜过程中薄膜的折射率、厚度、色散和填充密度等情况,为研究薄膜特性的一种有力工具,已引起薄膜工作者的重视。

其次,为了进一步提高装置的性能,要尽可能地排除干扰、提高透射率的测量精度和获得评价函数的确切极值,故宜选用位数较多的模数变换器、计算速度较快的微机等措施。

但是,当膜层的实际折射率与设计的折射率相差较大,或膜层有明显的非均匀性时,则监控的膜厚将产生较大的误差。因此,下一步工作是研究监控膜层的折射率、非均匀性和吸收等性能,同时还需要测定已镀膜层的实际折射率及厚度,故尚有大量的工作。

参加本装置研制的还有上海光机所蔡凤翔同志;沈阳计算所李福生等同志。

参 考 文 献

- [1] B. Vidal, A. Formier *et al.*; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 7 (1 Apr), 1038.
- [2] B. Vidal, A. Formier *et al.*; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 23 (15 Nov), 3851.
- [3] B. Vidal, E. Pelletier; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 23 (15 Nov), 3857.
- [4] P. Bousquet, E. Pelletier; *Thin Solid Films*, 1981, **77**, No. 1~3 (6 Mar), 165.
- [5] J. P. Borgogno, P. Bousquet *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 1 (1 Jan), 90.

Broadband optical monitoring apparatus

YANG BENQI, XU SHAOJI, JIN LINFA, ZHANG HONGFEN AND JIN HONGHOU

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 6 May 1986; revised 9 June 1986)

Abstract

The apparatus described in this paper consists of a minicomputer coupled to a rapid-scanning spectrometer that continuously measures the spectral profile during deposition of each layer for monitoring film thickness. The apparatus is demonstrated in the monitoring of a beam splitter made of three layers

Performance of the apparatus: measuring band width: 333 nm; spectral wavelength point: 50 point; transmittance accuracy: 1% spectral transmittance scan period: 12 sweep/sec.

Key Words: Optical thin film.

第十八届国际高速摄影和光子学会议

由中国光学学会主办的第十八届国际高速摄影和光子学会议, 将于 1988 年 8 月 28 日至 9 月 2 日在我国古城西安召开, 会议期间同时举办仪器和设备展览会。

中国核学会、中国计量测试学会、中国物理学会、中国仪器仪表学会、中国兵工学会和中国力学学会等协办这次会议。

严济慈教授任大会名誉主席, 王大珩教授任大会主席。

国际高速摄影和光子学会议是国际性序列会议, 每两年召开一次, 本届是在亚洲召开的第二次会议, 第一次是 1978 在日本东京召开, 在我国召开还是第一次。

高速摄影和光子学是研究事物高速变化和过程的有效手段, 是瞬态光学的测试技术。由于它的应用范围广, 因此每届国际会议, 参加的学者很多, 一般都在 500 人以上。

本届会议的第一轮通知已于今年三月向国内、外发出。

(陈俊人 供稿)