

doi: 10.3788/lop47.053101

复合光路光学镀膜宽光谱膜厚监控系统

任 豪 王巧彬 罗宇强 李康业

(广州市光机电技术研究院研发检测中心, 广东 广州 510663)

摘要 介绍一种复合光路宽光谱膜厚监控系统及其软硬件开发, 对系统结构组成和工作原理进行说明。通过增加中间通光孔式的分光镜的复合光路, 基于 LabVIEW 平台开发宽光谱膜厚监控软件, 实现了基于宽光谱扫描法的宽光谱膜厚监控和基于极值法的光学膜厚监控的兼容并用, 提高了光学镀膜膜厚监控的精确性和自动化, 为传统光学镀膜设备的升级改造提出了一种可行性技术。

关键词 膜厚监控; 光学镀膜; 复合光路; 宽光谱

中图分类号 O484.5 OCIS 310.6805 120.4800 文献标识码 A

Wide-Band Spectrum Optical Film Thickness Monitoring System with Compound Light Path

Ren Hao Wang Qiaobin Luo Yuqiang Li Kangye

(Research and Testing Center, Guangzhou Research Institute of Optics-Mechanics-Electricity Technology, Guangzhou, Guangdong 510663, China)

Abstract A wide-band spectrum optical film thickness monitoring system with compound light path is introduced. The structure, components and working principles of the system are analyzed. The monitoring system is developed by increasing a piece of spectroscopy with aperture to form compound light path, and wide-band spectrum monitoring software based on LabVIEW. Methods of wide-band spectrum optical film thickness monitoring based spectrum scanning method and optical film thickness monitoring based on extremum method are compatible. The accuracy and automatization of optical film thickness monitoring can be improved also. This monitoring system can be used in upgrade or reconstruction of optical coating devices.

Key words film thickness monitoring; optical coating; compound light path; wide-band spectrum

1 引 言

近年来, 高精度的光学仪器以及数码产品不断提高性能以适应市场需求, 使得光学产品对光学零部件镀膜的光学特性和精度的要求越来越高。然而膜厚控制常常是关系到薄膜制备成败的关键, 因此准确控制膜层厚度极其重要^[1]。目前, 光学镀膜生产中控制膜层厚度的主要方法有: 目视法、石英晶体振荡法、单波长极值法^[2]和宽光谱扫描法等^[3]。以评价函数进行宽光谱膜厚监控是由 B. Vidal 等^[4]在 1979 年提出的, 1981 年 A. D. Drobot 等^[5]发表了用宽带法制备的 11 层长波通滤光片的结果, 1986 年 I. Powell 等^[6]建立了一台 7 通道宽带监控系统。之后, 从事薄膜研究的工作者对此做了大量的研究^[7,8]。近年来国际上宽光谱膜厚监控技术逐步成熟并得到应用, 先进镀膜设备已经实现了基于宽光谱监控的自动控制, 但国产镀膜设备仍

收稿日期: 2009-09-18; 收到修改稿日期: 2009-10-24

基金项目: 广东省地市重点引导计划项目(2004B16001084)资助课题。

作者简介: 任 豪(1972—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事应用光学、光电检测、光机电一体化等方面的研究。

E-mail: r_h@tom.com

普遍以单波长极值法和石英晶体振荡法监控膜层厚度，传统的光学镀膜设备大都配置基于极值法的光学膜厚控制仪，采用垂直光路或倾斜光路，选择进行透射式或反射式光学膜厚监控。

目前报道的宽光谱膜厚监控系统^[8,9]，其光路系统都是借鉴极值法光学膜厚监控系统，只是在光路出口位置将接收光信号的光学膜厚控制仪改为光谱仪，由于无需光信号调制滤波，一般都去除了原光路中的调制器，但需提高光源的发光强度以降低杂散光的影响。光路结构上的区别使得这两种光学膜厚监控方法无法被同时采用，也难以对镀膜设备的膜厚监控系统进行更换或升级。本文提出一种复合光路光学镀膜宽光谱膜厚监控系统，增加中间通光孔式的分光镜的复合光路，探讨基于宽光谱扫描法的宽光谱膜厚监控系统和基于极值法的光学膜厚监控系统的兼容并用的可能性。

2 系统结构和工作原理

系统结构特点是在光学镀膜膜厚监控系统中设置复合光路，通过增加中间通光孔式的分光镜，将监测光信号分为2份分配复合使用。复合光路包括采用垂直光路或倾斜光路，可选择进行透射式或反射式光学膜厚监控。图1所示的复合光路光学镀膜宽光谱膜厚监控系统基于透射式垂直光路，由光发射装置、复合光路、光接收装置、控制电路、计算机和监控软件等组成。其中光发射装置包括光源、调制器和驱动电路，光接收装置包括通过光纤连接的光纤光谱仪和光学膜厚控制仪。

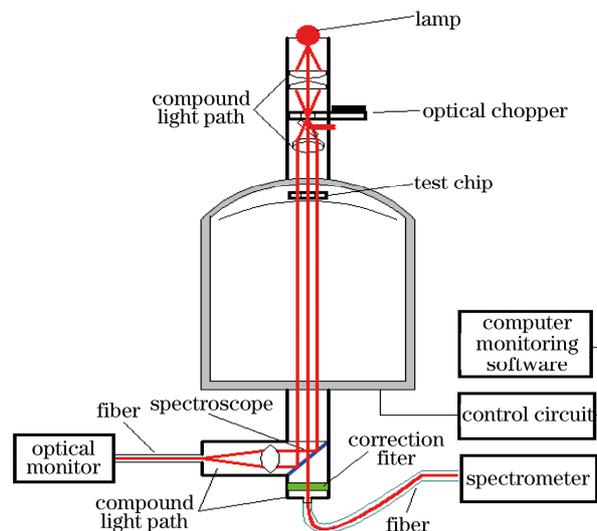


图1 复合光路宽光谱膜厚监控系统结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of wide-band spectrum film thickness monitoring system

系统工作流程及原理为：上光源发出的光被斩波器调制成脉冲光后进入镀膜机，在监控比较片上透射后，从镀膜机下方射出，其中一路光经过45°反射镜反射耦合后进入光导纤维，并由聚光镜会聚到单色仪，进入光学膜厚控制仪中，进行单波长极值法膜厚监测，另一路光经过45°反射镜中间的通光孔，并经过光源修正滤光片后，耦合到光导纤维中，再会聚进入光纤光谱仪中，进行宽光谱膜厚监控。其监控原理是通过输入理论设计的光学薄膜的透过率(或反射率)曲线，根据测量的实时透过率(或反射率)曲线，计算评价函数分析逼近程度做出判断，并将判断结果反馈给控制系统，可辅助判停或控制挡板实现自动控制，就可以达到监控膜厚的目的。

系统能够有效满足降低杂散光干扰的要求。在光学镀膜过程中，由于电子枪、离子源以及烘烤等原因，真空室内非常亮，相比之下光源信号的光强度很小。因此光学镀膜宽光谱监控过程中，监测信号受外界杂散光干扰、真空室内背景辐射等因数影响明显^[10]。对于单波长极值法膜厚监测，采用消除杂散光的方法是增加斩波器，对光源发出的入射光进行调制，入射光透过监控比较片后，光电倍增管对接收的光信号进行

光电转换, 然后监控电路进行滤波处理。对于宽光谱监控系统, 由于光信号调制频率太高, 无法进行软件滤波。采用低速斩波器, 对比亮周期信号和暗周期信号来消除杂散光^[1], 虽然可以消除杂散光干扰, 但改变斩波器的频率后, 原来的单波长极值膜厚控制仪则无法使用。本文优化设计的复合光路系统可以消除杂散光干扰, 这主要是因为反射镜通孔和光纤连接器使得光纤接收光锥角变得很小, 只有接近垂直入射的光才能耦合进光纤中, 镀膜过程中的测试数据也显示杂散光对实时宽光谱的采集几乎没有影响。

3 实验结果及说明

复合光路光学镀膜宽光谱膜厚监控系统的开发实验在国产LDSX-800低压反应离子镀膜机上进行, 镀膜设备上配置MKG-5光学膜厚控制仪进行单波长极值法膜厚监测, 使用美国海洋光学的USB2000光纤光谱仪进行光谱采集。在完成如图1所示的设备膜厚监控系统复合光路改造的基础上, 基于LabVIEW虚拟开发平台, 重点进行宽光谱膜厚监控软件的开发。根据实时宽光谱、评价函数、单波长极值等多种方法综合膜厚监控的要求, 采用模块化设计, 监控软件主要由初始化设置、理论膜系设计及理论光谱显示、实时光谱采集和显示、宽光谱计算判断、反馈控制、总控、预留扩展等模块组成。基于LabVIEW开发的宽光谱膜厚监控软件的主界面如图2所示。

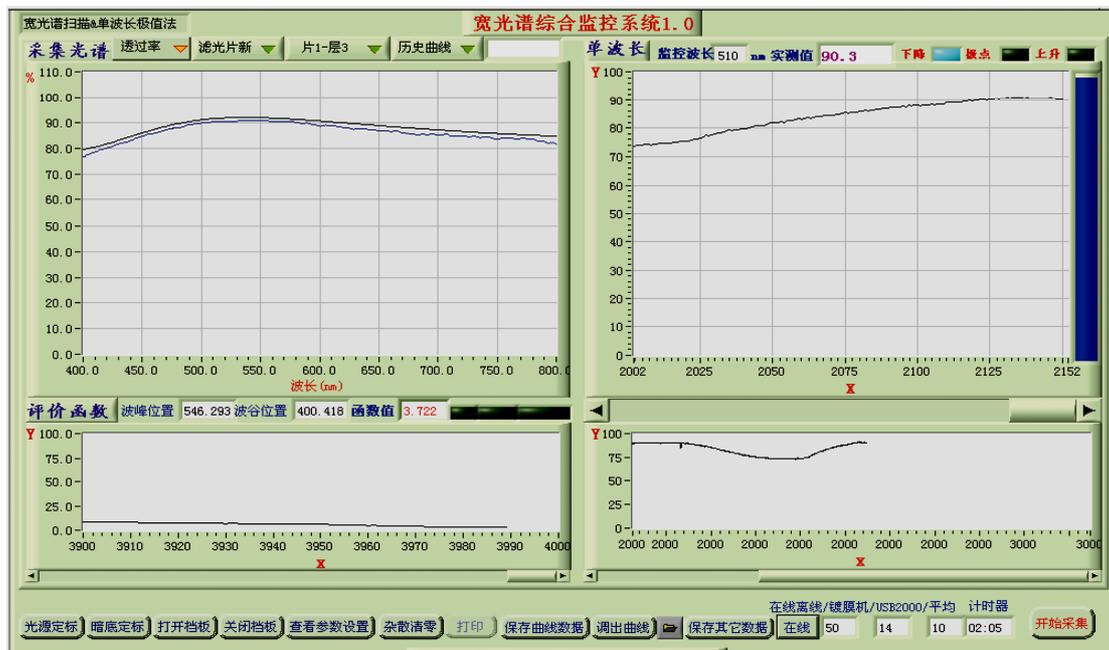


图2 宽光谱膜厚监控系统软件界面

Fig.2 Interface of wide-band spectrum film thickness monitoring software

图2界面左上图为实时显示出光学镀膜过程中膜层的光谱曲线变化, 通过对USB2000光纤光谱仪积分采集的光谱数据, 经过取样平均和平滑处理等数据处理后得到的。同时导入理论膜系设计的光谱曲线进行对比显示。理论光谱曲线和实时光谱曲线的分析对比是完成宽光谱膜厚监控的基础。本系统光谱曲线监测反映的是光学膜层透过率的变化, 以透镀膜过程中有监控比较片时系统接收到的光能量 $\varphi_i(\lambda)$ 和没有监控比较片时系统接收到的光能量 $\varphi_A(\lambda)$ 的比值作为镀膜过程中的实时透过率 $T_i(\lambda)$, 即 $T_i(\lambda) = \varphi_i(\lambda) / \varphi_A(\lambda)$ 。

图2界面右上图反映出光学镀膜过程中单波长透过率的变化, 可以进行单波长极值法监控。通过从实时透射光谱中取出单波长透过率, 对单波长透过率求导, 当单波长极值 $dT(\lambda_0, d, t) / d(t) = 0$ 时, 或者根据光谱特性在极值点附近变化变慢的特点, 对单波长透过率求二阶导数, 当 $d^2T(\lambda_0, d, t) / d(t)^2 \leq m$, 其中 m 为设定值, 达到极值时, 做出自动判停, 就可以实现单波长极值法膜厚监控。在此基础上, 还可以扩展采用过

极值法和双波长监测法进行膜厚控制^[12]。

由于系统采用复合光路，宽光谱膜厚监控系统和光学膜厚监控系统可以兼容并用，因此可以同时镀膜过程中采用镀膜设备上配置MKG-5光学膜厚控制仪，可直接观察仪器读数进行膜厚判断和手动控制关停，进行单波长极值法膜厚监测。图2界面下图是对理论光谱曲线和实测光谱曲线进行对比分析，采用评价函数的方法，分析实测光谱曲线向理论光谱曲线的逼近程度，进行膜厚监控。

$$\text{评价函数}^{[13]} f_i = \sum_{i=1}^k |T'_i(\lambda_i, d_i) - T_i(\lambda_i, d)| \omega_i, \text{ 式中 } f_i \text{ 为第 } i \text{ 层的评价函数, } T'_i = T'_i(\lambda, d_i) \text{ 为第 } i \text{ 层理论设计(膜厚要求为 } d_i) \text{ 的透过率。}$$

在镀膜过程中，当 f_i 达到或逼近极小值，或者当 $df_i(t)/d(t) = 0$ 达到极值时，说明 d 逐渐逼近到 d_i ，镀膜过程中的光学膜层的光谱特性逼近理论设计要求，从而做出判停，达到实时直观监控膜厚的目的。

复合光路光学镀膜宽光谱膜厚监控系统的主要功能和技术指标为：宽光谱扫描波长范围为400~800 nm，波长分辨率为1 nm，采集扫描速度为12 次/秒(积分时间为70 ms)，测量扫描速度为2 次/秒，透射率测量精度为0.1%，主波长控制精度为1%。

选择增透膜、滤光片、红膜等膜系，使用光学镀膜宽光谱膜厚监控系统，对比光学膜厚控制仪的单波长极值监测，进行光学镀膜工艺实验研究，图2显示的为单层增透膜系的膜厚监控过程。由于镀膜过程中增透膜透射率的变化幅度很小，采用单波长极值法时难以精确控制。采用宽光谱膜厚监控系统，可以用实时光谱和理论光谱进行对比，计算评价函数^[3]，同时显示单波长(中心波长)相对透射率和透射率的变化规律，可以更加准确地判断极值点。该项技术也非常适合于多层宽带增透膜系的设计开发和监控^[14]。对于涉及非1/4膜层的、滤光片、红膜等非规整膜系，宽光谱监控同样体现出控制更加准确，并可以了解整个镀膜过程中光学薄膜的光谱特性变化的优点。

同时，镀膜工艺实验证明了采用复合光路实现在基于极值法的光学膜厚监控系统基础上，扩展基于宽光谱扫描法的宽光谱膜厚监控系统，并且可以兼容并用。通过这两种不同膜厚监控技术的相互结合和对比分析，丰富了镀膜过程中的膜厚监控技术手段和镀制薄膜光学特性信息，增加光学镀膜过程中数据和信息量的获取，提高膜厚监控的精确性和自动化程度。

4 结 论

提出一种复合光路宽光谱膜厚监控系统，利用复合光路的兼容性，实现了基于宽光谱扫描法的宽光谱膜厚监控和基于极值法的光学膜厚监控的兼容并用。介绍了系统的软硬件开发，其中基于 LabVIEW 平台开发的复合光路宽光谱膜厚监控系统可采用实时宽光谱、评价函数、单波长极值、色度分析等多种方法综合监测光学薄膜的实时光谱特性，同时通过增加中间通光孔式分光镜的复合光路，保留了单波长极值光学膜厚控制仪的正常使用，提高了镀膜设备光学膜厚控制系统的可选择配置的灵活性以及光学镀膜膜厚监控的精确性和自动化，为传统光学镀膜设备的升级改造提出了一种可行性技术。

参 考 文 献

- 1 Gu Peifu. Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1990. 155~179
顾培夫. 薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990. 155~179
- 2 Li Yunqi. Technology and Instruments of Vacuum Coating[M]. Shenyang: Northeastern University of Technology Press, 1992. 276~287
李云奇. 真空镀膜技术与设备[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1992. 276~287

- 3 Jia Qiuping, Zhang Zhemin, Lu Weiqiang *et al.*. Growth of high precision anti-reflectance multilayers under broadband monitoring and controlling[J]. *J. Vacuum Sci. Technol.*, 2009, **29**(4): 457~460
贾秋平, 张喆民, 卢维强 等. 宽光谱监控法镀制高精度增透膜的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2009, **29**(4): 457~460
- 4 B. Vidal, A. Fornier, E. Pelletier. Wideband optical monitoring of nonquarter wave multilayer filters[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(22): 3851~3856
- 5 A. D. Drobot, V. N. Egorov, Yu. K. Klokov *et al.*. Optimization of optical coating deposition conditions[J]. *Sov. J. Opt. Technol.*, 1981, **48**: 496~499
- 6 I. Powell, J. C. M. Zwinkels, A. R. Robertson. Development of optical monitor for control of thin-film deposition[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(20): 3645~3652
- 7 Liu Xiaoyuan, Huang Yun, Zhou Ningping *et al.*. The system of the wideband monitoring of optical film thickness[J]. *J. National University of Defense Technology*, 2001, **23**(1): 23~27
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
- 8 Zhang Cheng, Lu Weiqiang, Wang Yongtian. Autocontrol technology of optical thin-film manufacture based on broadband optical monitor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1136~1139
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
- 9 Wang Haifeng, Huang Guangzhou, Yi Jirong. Study of optical filter film thickness monitoring system based on the method of wideband spectrum scanning[J]. *Vacuum Electronics*, 2004, **(6)**: 29~31
王海峰, 黄光周, 于继荣. 基于宽光谱扫描法的光学膜厚监控系统的研究[J]. 真空电子技术, 2004, **(6)**: 29~31
- 10 Wu Kaishun, Pan Hongchang, Zhang Fuguang *et al.*. Noise depression of monitoring signal for optical coating with wideband spectrum[J]. *Chinese J. Sensors Actuators*, 2006, **19**(6): 2574~2577
伍楷舜, 潘洪昌, 张甫光 等. 光学镀膜宽光谱监控的信号压噪[J]. 传感技术学报, 2006, **19**(6): 2574~2577
- 11 Zhang Cheng, Lu Weiqiang, Wang Yongtian. In-situ full spectrum optical monitor for optical thin film[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2003, **24**(4): 85~87
张诚, 卢维强, 王涌天. 光学薄膜在线宽光谱膜厚控制仪[J]. 仪器仪表学报, 2003, **24**(4): 85~87
- 12 Lin Yuxiang, Zhang Yueguang, Gu Peifu. In-situ optical monitoring system for thin film filter deposition process[J]. *Optical Instruments*, 2004, **26**(2): 105~108
林宇翔, 章岳光, 顾培夫. 薄膜滤光片淀积过程实时光学监控系统[J]. 光学仪器, 2004, **26**(2): 105~108
- 13 Zhou Pengfei, Chen Guilian, Zhang Rongfu. Development the instrument of monitoring the thickness of film by wideband spectrum[J]. *Optical Instruments*, 2001, **23**(5): 36~40
周鹏飞, 陈桂莲, 张荣福. 宽光谱膜厚监控仪的研制[J]. 光学仪器, 2001, **23**(5): 36~40
- 14 Ma Xiaofeng, Wang Dan, Liu Dingquan *et al.*. Design of non-polarizing broadband antireflection coating using equivalent layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 563~566
马小凤, 王丹, 刘定权 等. 利用等效层的消偏振宽带减反膜设计[J]. 光学学报, 2007, **27**(3): 563~566