光电英才网 gd.epjob88.com 光电行业招聘求职首选网站 2011福布斯中国最具发展潜力企业上榜企业（第64位）
维普资讯 http://www.cqvip.com

第33卷第9期 光 子 学 报 Vol. 33 No. 9
2004年9月 ACTA PHOTONICA SINICA September 2004

基于宽光谱监控的光学薄膜自动控制技术

张 诚 卢维强 王涌天
（北京理工大学信息工程学院光电工程系，北京 100081）

摘 要 单波长监控很难精确控制宽波段上的光学特性．若采用宽光谱扫描可以在很宽的波长范围内监控薄膜特性，则控制既直观又准确．虽然宽光谱监控的思想很早就提出了，但这项技术的实用性一直不高．开发了一套宽光谱监控系统，使用线阵CCD配合计算机，可以实现光谱快速扫描．通过采用一些特殊的方法，系统可以达到较高的精度．配合改进的光学薄膜监控软件，可以满足基于宽光谱监控的自动控制要求．

关键词 自动控制；宽光谱监控；膜厚监控；在线监控；光学薄膜
中图分类号 O484.4⁺1 **文献标识码** A

0 引言

随着光学薄膜复杂性和精度要求的不断提高，过去的控制方法已经无法满足要求．近年来一种直观易用的监控技术-宽光谱监控技术[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]．为了提高国产设备的整体性能，开发了一套高精度的宽光谱在线监控系统．该系统采用高灵敏度的CCD传感器，结合电子、计算机技术，使得控制精度大大提高，同时对镀膜过程的控制也大大简化．目前已经在国内数家镀膜企业得到成功的应用．但是，采用宽光谱监控的自动判停相比单波长监控自动判停要困难得多，这在很大程度上限制了这项技术的发展和应用．我们在这方面做了一些工作并取得了一定的进展．

1 系统原理

系统光源使用卤素灯，可用光谱范围为400～800 nm．光由一个低速斩波器调制成明暗交替．光经过聚光系统投射到比较片上，反射接收后经过光纤进入光谱仪．光谱仪中的光栅将入射光投射到2048像元的线阵CCD上，形成一个从紫外到红外分布的色带．CCD的不同像元接收不同波长的光波，经过一定的积分时间，由驱动电路将各个像元的电流大小读出并放大．经AD转换送入计算机处理．系统在镀膜过程中不断测量膜系从400 nm到800 nm波长范围的光谱透射率或反射率，对膜系实现实时监控．系统原理图（上反射式）见图1．

光学薄膜大致可以分为增透膜、高反膜、分光膜、截止滤光片、带通滤光片以及其它一些特殊要求的膜系．除了窄带滤光片以外，大部分的薄膜在较宽的波长范围内对光谱特性有要求，我们称之为宽带产品．

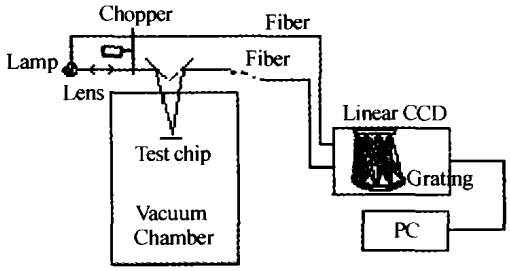


图1 宽光谱监控系统原理图
Fig. 1 System discription

传统的单波长极值监控方法[6]只监控一个波长点的光度值，对其它波长无法兼顾．由于薄膜的镀制是一个复杂的过程，薄膜的折射率和色散往往和理论值有一定的出入，因此极值法监控宽带膜系镀制很困难．而宽光谱监控仪监控很大的一个波长范围内的光谱特性，得到的信息量远远高于单点监控方法，可以兼顾不同波长上的光谱特性要求．另外，极值法及其衍生出来的方法一般要求膜系为规整膜系，即膜层的光学厚度为1/4监控波长的整数倍，从而膜层停在极值点处．目前复杂的非规整膜系越来越多，极值法监控这种膜系有困难．而宽光谱监控可以方便地监控非规整膜系．膜系镀制过程中，宽光谱监控不断变化的光谱曲线，单点监控相当于取其一个截面．其关系如图2所示．

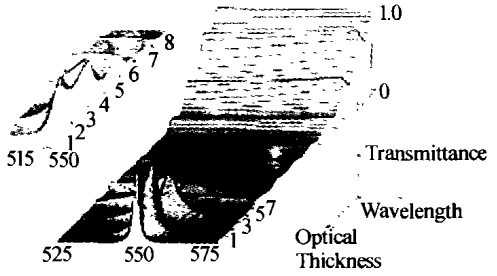


图2 宽光谱监控与单波长监控的关系
Fig. 2 Relationship of broadband monitoring and singlewavelength monitoring

Tel：010-68942687 Email：zhang. bit@163. net
收稿日期：2003-09-02

光电英才网 gd.epjob88.com 一览英才网招聘网站成员 光电行业招聘求职首选网站 2011福布斯中国最具发展潜力企业上榜企业（第64位）

2 存在问题及解决方法

宽光谱自动判停依靠测量曲线和理论曲线的吻合来判断. 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.

我们早在1998年就开发出了该系统的I型. I型系统主要存在三个问题:1)在400~500 nm以及700~800 nm处测量信号不稳定,抖动较大,使得该部分信号基本上不可用. 2) 光度测量精度不够,在1%以下,而且系统整体漂移较大,判停困难. 3) 一般镀制层数在5层以上时,实测曲线和理论曲线开始有较大背离,判停困难.

为了能够实现自动控制,系统必须达到较高的测量精度,并且在整个光谱(400~800 nm)上信号稳定可用. 实测曲线和理论曲线应该吻合良好.

造成第一个问题的原因在于:由于卤素灯光谱和CCD光谱响应的综合作用,CCD在整个光谱上的输出信号大小相差在10倍左右,见图3. 这种情况下,在相同的积分时间内,当低响应波段上电流很小时,高响应波段上已经趋于饱和甚至已经饱和. 为了解决这个问题,我们在光路系统中加入平坦滤光片使响应趋向一致. 平坦后响应见图4.

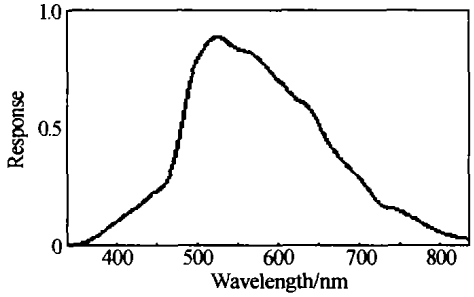


图3 加平坦片前响应曲线

Fig. 3 Unflattend response curve

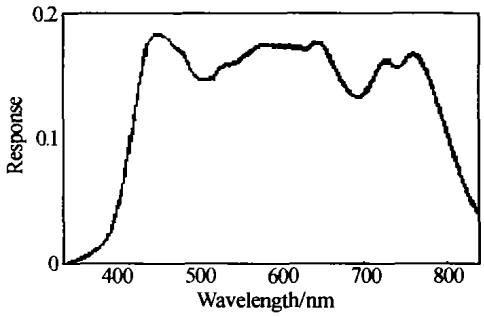


图4 加平坦片后响应曲线

Fig. 4 Flattend response curve

采用该方法处理后,在长波和短波上存在的信噪比差的问题得到了解决,在整个光谱范围内信号都很稳定.

为了解决信号精度问题,采用下述方法:

1)为了减小CCD噪声的影响,在CCD的2048个像元中,有24个像元是不接收光的哑元,将这24个哑元的电流平均值作为CCD暗电流值,其它像元的值减去该值,可以有效减小CCD暗电流的影响. 2) 为了消除光源以及CCD快速扰动的影响,对CCD得到的信号进行多次采样平均和窗口平滑处理后再送入计算机. 3) 稳定光谱仪工作环境,以半导体冷却技术将其工作环境稳定在5℃左右.

采用上述方法后,信号精度提高一个量级,达到0.1%的测量精度.

真空室内杂散光的影响使信号漂移,在镀膜时,真空室内由于电子枪、离子源以及烘烤等的开关将使信号产生较大的漂移. 为了消除杂散光的影响,一方面,我们对光路系统进行优化设计,在尽可能提高光能的前提下,减小接收光锥角,使真空室内的杂散光只有极少量进入接收系统. 另一方面,用低速斩波器将入射光分为亮周期和暗周期,在亮周期内,系统信号=信号光+杂散光. 而在暗周期,系统信号=杂散光. 因为杂散光在镀膜过程中是动态变化的,所以监控过程中不断测量亮暗周期的信号,将亮周期的信号值减去暗周期信号值得到实际值. 有效去除杂散光影响.

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. 我们知道,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背离. 为了解决这个问题,我们开发了一个光学常数测定程序,在每一台镀膜机上实测光学常数. 原理如下:

我们知道,膜料没有吸收时,反射率或透射率随膜层厚度的增加呈等幅震荡,当有吸收时,反射率或透射率曲线呈震荡收敛形状,分别取$n=2.3$,$k=0.0$和$n=2.3$,$k=0.01$,作透射率随厚度变化曲线. 见图5.

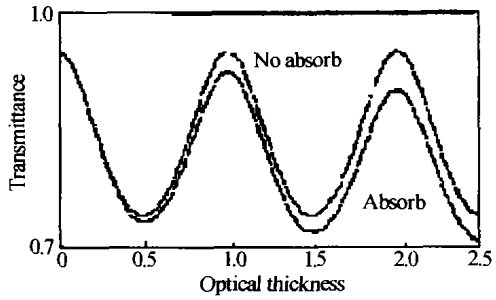


图5 透射率随光学厚度变化曲线

Fig. 5 Transmittance vs optical thickness

光电英才网 gd.epjob88.com 一览英才网招聘网站成员 光电行业招聘求职首选网站 2011福布斯中国最具发展潜力企业上榜企业（第64位）

在新鲜基片上镀单层膜，由于我们采用宽光谱监控，可以得到 400 ~ 800 nm 上的任意点处的透射率或反射率随厚度变化的曲线．采用拟合的方法可以计算出任意波长上的 n、k 值．从上图可以看出，膜层越厚，由于吸收导致的光度变化越明显，n、k 值计算越精确，但是膜层过厚将导致折射率的变化，一般以 800 nm 处经过两个极值为佳．理论和实验均可证明，对于 0.1% 的测量精度，n、k 值测定精度可以达到 0.001，完全满足常规光学镀膜的需要．我们在采用该方法测定膜料光学常数后，实测曲线和理论曲线的吻合程度大大提高，完全可以满足自动判停的要求．详细处理方法已有另文专门研究．

3 镀制实验

24 层冷光膜，膜系结构 5(1.15h1.15l)2(hl)5(0.85h0.85l)，高折射率材料使用 ZnS，低折射率材料使用 SiO_2（SiO 充氧蒸发）；基片为 K9 玻璃．该膜系采用单波长极值法控制时，可分为三个膜堆，分别用 644 nm，560 nm 和 476 nm 作为监控波长镀在 3 ~ 4 片比较片上．操作较复杂，成品率不高，产品一致性差．

我们使用宽光谱监控仪作了几个步骤的实验．

首先，采用 ZnS 和 SiO_2 的通用光学常数来计算理论光谱曲线，实测中，第 5 层以后的实测光谱曲线和理论光谱曲线开始有较明显的偏差，见图 6，其中实线为理论曲线，虚线为实测曲线（下同）．而且误差逐步加大，原因在于：光学常数的误差使实测曲线与理论曲线不能完全重合，从而造成判停误差，导致膜层厚度误差，厚度误差的累积加剧了曲线的背离，使后面的判停更加困难．

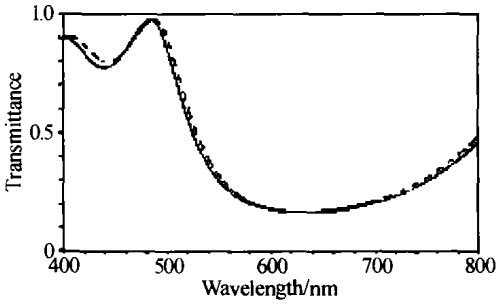


图 6 第 5 层监控结果

Fig. 6 Coating result of 5 layers

不换比较片的情况下，最终结果见图 7.

在这种情况下，采用更换比较片的方法，可以截断误差的累积，得到更好的结果．按照实际情况，我们每 8 层膜更换一个比较片，结果有明显改善，得到的结果见图 8.

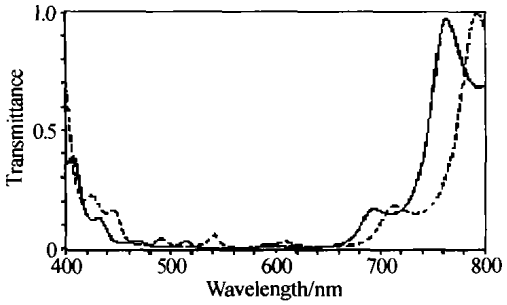


图 7 最终镀制结果

Fig. 7 Final coating result

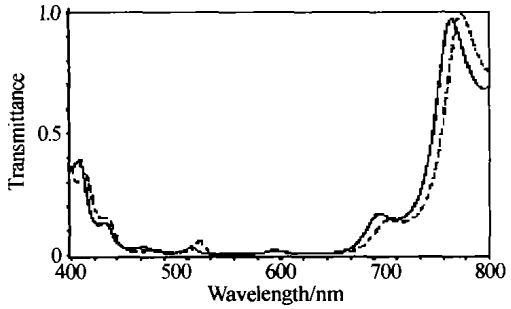


图 8 换片镀制最终结果

Fig. 8 Final coating result by change test chip

造成实测曲线和理论曲线偏差的最大原因是实际镀制的薄膜的光学常数和理论光学常数不一致．因此，我们利用本系统在镀膜过程中测定了薄膜的实际光学常数，用测定的光学常数代替通用的光学常数来计算镀制过程中的理论曲线，实测曲线和理论曲线的吻合程度有很大的提高．不用更换比较片也可以得到很好的结果，见图 9.

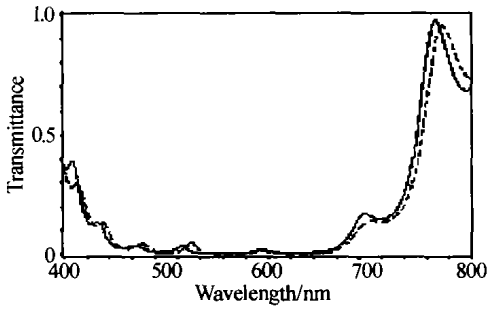


图 9 实测材料光学常数后镀制最终结果

Fig. 9 Final coating result by measuring material's optical constarts

4 结论

实验证明，宽光谱监控系统有很高的实用性．具有速度快、精度高，易操作的优点．配合膜料光学常数测定功能，实测光谱和理论光谱可以良好吻合，从而为自动判停提供依据．目前我们这套系统已经实现基于宽光谱监控的光学薄膜自动控制．

光电英才网 gd.epjob88.com 一览英才网招聘网站成员 光电行业招聘求职首选网站 2011福布斯中国最具发展潜力企业上榜企业（第64位）

维普资讯 http://www.cqvip.com

参考文献

1 Pulker H K. Coatings on Glass. ElSEVIER, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo, 1984, 306 ~ 307

2 Vidal B, Fronier A, Pelletier E. Wideband optical monitoring of nonquarterwave multilayer filters. *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．光学仪器，1999，**21**(4-5)：110 ~ 113
Cai X Y, Sun D X, Juchihefu. *Optical Instruments*, 1999, **21** (4-5): 100 ~ 113

4 Telemark Co. Ltd, Model OM820 in-situ spectroscopic optical monitor user's guide, 2000

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

6 顾培夫．薄膜技术．浙江：浙江大学出版社，1990. 155 ~ 165
Gu P F. Thin Film Technology. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1990. 155 ~ 165

Autocontrol Technology of Optical Thin-film Manufacture Based on In-situ Broadband Optical Monitor

Zhang Cheng, Lu Weiqiang, Wang Yongtian

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

Received date: 2003-09-02

Abstract It is hard to precisely control optical characteristic of thin film in wide band using the single wavelength monitor due to the material dispersion, monitoring precision and something else. Broadband monitor can monitor optical characteristic for wide band, therefore it is convenient and precise. However while the thought of broadband monitor had been brought forward, practicability of this kind monitor is low. Recently, with the development of electronics technology and computer technology, make it possible to develop high performance broadband monitor. A new broadband monitor is developed using linear CCD as detector, it can do spectrum scanning very quickly. System can achieve high measuring precision, working with advanced optical thin film coating program, system can fulfill the requirement for automatic control based on broadband monitor.

Keywords Auto Control; Broadband monitoring; Optical thickness monitor; In-situ monitor; Optical coatings



Zhang Cheng studied in Beijing Institute of Technology from 1996-1999, focused on optical thin film computer aided design technology, got master degree in the field of optical engineering. From 2001 to now, He studied in Beijing Institute of Technology as a Ph. D. student and focuses on optical thin film thickness monitoring technology.

光电英才网 gd.epjob88.com 一览英才网招聘网站成员　光电行业招聘求职首选网站　2011福布斯中国最具发展潜力企业上榜企业（第64位）

光电英才网 光电行业招聘求职首选网站
找工作就上光电英才网
电　话：0755-86153313
传　真：0755-22632616
邮　箱：gdhr06@epjob88.com
网　站：http://gd.epjob88.com