

文章编号: 0258-7025(2009)06-1555-04

# 可扩展光学薄膜 Mapping 测量平台的设计与实现

陆卫杰<sup>1</sup> 张荣君<sup>1</sup> 陈一鸣<sup>1</sup> 郑玉祥<sup>1</sup> 程 序<sup>2</sup> 李传文<sup>2</sup> 陈良尧<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>复旦大学信息学院光科学与工程系, 上海 200433)  
(<sup>2</sup>复旦汇成光通信器件有限公司, 上海 200433)

**摘要** 根据模块化的设计思想, 设计并实现了一个可扩展的光学薄膜 Mapping 测量平台。通过添加设备模块, 可以使此平台支持多种 Mapping 测量类型。利用此平台成功测量了波分复用(WDM)滤波片的透射光谱特性 Mapping 图。

**关键词** 薄膜; Mapping 测量平台; 模块; 可扩展性

**中图分类号** O484 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1555

## Design and Realization of Extensive Optical Thin Film Mapping Measurement Platform

Lu Weijie<sup>1</sup> Zhang Rongjun<sup>1</sup> Chen Yiming<sup>1</sup> Zheng Yuxiang<sup>1</sup>  
Cheng Xu<sup>2</sup> Li Chuanwen<sup>2</sup> Chen Liangyao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Department of Optical Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)  
(<sup>2</sup>Fudan-Huicheng Optical Communication Devices Co. Ltd., Shanghai 200433, China)

**Abstract** An extensive optical thin film mapping measurement platform was designed and realized using the module-based design model. Different types of mapping measurement can be supported by the platform through adding new device modules. The mapping transmittance spectrum of a wavelength-division-multiplex (WDM) filter is successfully measured with the platform

**Key words** thin films; mapping measurement platform; module; extensity

## 1 引 言

Mapping 测量是针对样品某一物理特性对样品表面进行全面的测量,它能够完整地反映样品表面物理特性的形貌特征,是检验样品表面物理特性均匀性和成品质量的重要方法之一。为了满足各种 Mapping 测量需求,人们开发了多种 Mapping 测量系统,包括一些商用的测量系统,如各种扫描电子显微镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)测量系统,以及为了某一测量需求实验室自行研发的测量系统<sup>[1~3]</sup>。

光学薄膜在多个领域中有着广泛应用。近几年

对光学薄膜的研究仍然有许多新的进展,范围涉及滤光膜<sup>[4,5]</sup>、高反射膜<sup>[6,7]</sup>、减反射膜<sup>[8,9]</sup>的设计与研究、光学薄膜表面粗糙度测量<sup>[10]</sup>等。Mapping 测量是测量光学薄膜各物理特性的区域分布特征的重要手段。本文设计并实现了一个可扩展的基于扫描式的光学薄膜 Mapping 测量平台,能够对光学薄膜的光学特性做 Mapping 测量,并且具有可扩展能力,能够以增加模块的方式支持新的 Mapping 测试类型。平台由控制系统、定位设备、测量设备和数据库 4 个部分组成,可扩展性主要通过定位设备和测量设备的模块化处

收稿日期: 2008-10-22; 收到修改稿日期: 2008-11-24

**基金项目**: 国家自然科学基金重点项目(60638010)、国家自然科学基金面上项目(60327002, 60778028)和教育部留学回国人员科研启动基金资助课题。

**作者简介**: 陆卫杰(1985-),男,硕士研究生,主要从事信息功能材料的光学性质和光学仪器系统研究。

E-mail: 082021007@fudan.edu.cn

**导师简介**: 张荣君(1972-),男,副教授,硕士生导师,主要从事信息功能材料的光学性质、光学仪器系统与光子学器件研究。E-mail: rjzhang@fudan.edu.cn (通信作者)

理来实现。为了检验平台的实用性,对应用于光通信波分复用(WDM)系统的窄带通滤波片做了透射光谱特性的 Mapping 测量。

## 2 平台的设计

平台采用扫描式 Mapping 测量方式,同时将薄膜样品的测量点定位工作和特性测量工作分开,这样一般只能执行单点测量的测量仪器就能在定位设备的协助下以扫描的方式完成 Mapping 测量,如图 1 所示。平台由控制系统、定位设备、测量设备和数据库 4 个部分组成。其中控制系统是指平台的控制软件,它负责平台的运行控制,实验人员通过控制系统控制各设备的运行,查看样品的测量数据;定位设备是指负责光学薄膜样品在 Mapping 测量时测量点的定位工作的实验仪器;测量设备是指负责光学薄膜样品在 Mapping 测量时的样品特性(如透射光谱的中心波长,3 dB 带宽等)的测量工作的实验仪器;数据库负责存储 Mapping 测量时产生的数据。对于控制系统,其他组件都需要它的控制才能协调工作,是平台的核心部分,因此稳定性是首要条件;对于定位设备和测量设备,精度和速度是首要的性能要求;对于数据库,在数据吞吐量很大时数据的读取和存储速度是必须首先考虑的因素。

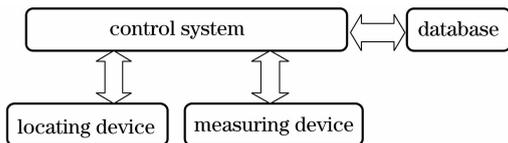


图 1 平台的基本组成设计示意图

Fig. 1 Basic components of the platform

如图 1 所示,定位设备和测量设备各自都只与控制系统存在关系,而与其他设备不存在关系,所以修改、调换、添加或删除任一设备,都不会影响其他设备。设备和控制系统是相对独立的组件,因此控制系统在连接的设备更改时,并不需要更改自身的结构,只需要相应更改自身的设置。可扩展性设计的关键在于如何实现这种功能,即控制系统在不改变自身结构的条件下识别和调用定位设备和测量设备,使它支持不同类型的定位设备和测量设备。

将定位设备和测量设备作模块化处理,即将每一个定位设备和测量设备都作为一个模块。同时,效仿操作系统、硬件设备和设备驱动之间的关系<sup>[11]</sup>,本文引入了定位设备和测量设备的平台设备驱动的概念。平台设备驱动是指用于控制系统和各设备间连接和通信的驱动软件,它是设备模块的一

部分。控制系统定义了一套适用于控制系统和设备模块间的通信接口,平台设备驱动必须实现这些通信接口,才能使控制系统识别和调用所连接的设备。平台设备驱动对于控制系统总是提供相同的调用接口,而对于定位设备或测量设备则都是根据设备的具体功能而各异的。这样,平台设备驱动将控制系统和设备模块分离开来,使它们相对独立。只要设备模块提供相应的平台设备驱动,控制系统就能够识别和调用设备模块,通过添加或移除不同类型的设备模块,就可以让平台支持不同的光学薄膜 Mapping 测量类型。

## 3 平台的实现

平台的基本硬件组成如图 2 所示,主要由计算机、二维定位仪、光谱测量仪、放大自发辐射(ASE)光源等组成。在满足不同测试需要时,也可以通过添加设备模块如添加新的定位仪、光谱测量仪等设备来实现。整个测量平台被放置在光学隔振平台上,保证了整个测试系统的稳定可靠工作。



图 2 平台的基本硬件组成

Fig. 2 Basic hardware components of the platform

直接采用 NetBeans 平台作为控制系统的基础框架,在此基础框架上开发控制系统,并在 NetBeans 平台的模块管理机制的基础上实现控制系统的设备模块管理机制<sup>[12]</sup>。平台的控制系统采用 Java 语言编写,这使任何安装了 Java 运行时环境的计算机都能够运行此软件。平台采用 MySQL 数据库,这是因为在各种流行的数据库软件中,MySQL 数据库在大数据吞吐量情况下的数据处理速度比较快。平台的基本定位设备是自行研制的精密二维定位仪,它通过步进电机控制样品测量点的定位。其中,可测量的样品最大直径(定位范围)为 100 mm;步进电机的定位精度预设为 0.2  $\mu\text{m}$ ,可通过调节步进电机驱动器的细分度来调节步进电机的定位精度;定位仪平移导轨的定位误差为 3  $\mu\text{m}$ ,定位仪整体的定位速度约每秒 1 个测量点。平台的基

本测量设备是由安捷伦 86142B 光谱测量仪、ASE 宽光谱光源、测量支架、光纤等其他配件组成的测量系统,其中光谱仪的波长测量最高精度为 0.1 nm。

对于 Mapping 测量过程中的一个单点测量操作,步骤可归纳为:控制软件控制二维定位仪将样品测量点定位到一个新点上,然后控制软件控制光谱仪测量样品的光谱和其他参数,并将这些数据存储到数据库里,并适时将数据反馈给实验人员。根据平台的基本配置,完成一次单点测量,大约需要 30~60 s,而一次完整的 Mapping 图测量耗时长短取决于被测样品的大小以及 Mapping 测量点间隔(即 Mapping 步长)的大小,一般需要数小时。Mapping 图测量的主要时间消耗在数据存储和光谱仪测量上。前者的来源是 MySQL 数据库存储速度有限,通过更换数据库软件可能会缩短存储时间,提高 Mapping 测量速度;后者的改善在将光谱仪的测量精度调到较低时比较明显。

图 2 所示的平台基本配置只支持光学薄膜样品的透射光谱和相关特性(如透射光谱中心波长,3 dB 带宽等)的 Mapping 测量,但是通过添加或更换新的定位设备和其他测量设备,可以扩展平台所支持的 Mapping 测量类型。控制系统添加新设备模块的操作和 NetBeans 平台添加模块的操作相同,通过对控制系统简单的几步设置操作就可以完成新模块的添加,其他设备和数据库并不需要做任何修改。例如,如果将本 Mapping 测量平台按照文献[13]扩展成支持薄膜样品表面粗糙度测量的 Mapping 测量系统,需要做的只是更换相应的测量模块,即将光谱仪、ASE 光源、测量支架等组成的测量光路更换成激光、分光棱镜、正透镜和 CCD 相机的测量光路,并为新设备增设一个平台设备驱动,最后修改控制软件的相应配置即可实现;如果将本 Mapping 测量平台按照文献[14]扩展成实现棱镜耦合测量系统的功能,定位设备和测量设备都需要更换,但控制软件和数据库可以继续重复使用。这反映了平台方便的可扩展性。

#### 4 WDM 滤波片透射光谱的 Mapping 测量

为了检验平台的实用性,利用此平台对 WDM 滤波片进行了透射光谱特性的 Mapping 测量。WDM 多层介质膜窄带通滤波片<sup>[15]</sup>在研制过程中一般首先生长在直径为 100 mm 的圆衬底上,然后根据需要切割为大约 1.0 mm×1.0 mm 的小片,为

此需要在制备过程中多次检测 100 mm 直径范围内的膜片质量,以对后续工艺进行调整。常规的测试都是手工操作,选取有限测量点进行测试,而且每次测量都需要调整光路,而利用本系统则只需一次调整光路,计算机自动控制完成所设定区域的 Mapping 测量。实验中 WDM 多层介质膜窄带通滤波片的中心波长设计值为 1550.8 nm。

实验首先单次测量了滤波片中心点位置的透射光谱,如图 3 所示。光谱的一些重要参数如下:中心波长为 1550.8 nm,峰值波长为 1550.9 nm,3 dB 带宽为 1.0 nm,与设计值符合得很好。

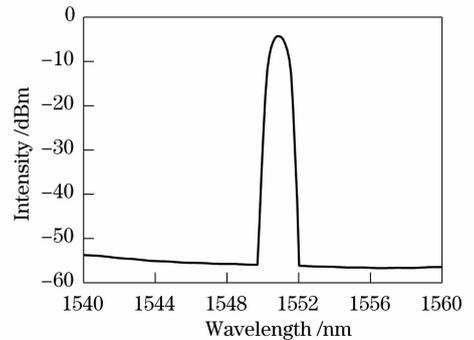


图 3 中心点透射光谱曲线

Fig. 3 Transmittance spectrum of the central point

Mapping 测量所选取的区域为滤波片中心部分直径 50 mm 范围内,测量的 Mapping 步长设为 1 mm,即测量的 Mapping 图的空间分辨率为  $1 \text{ mm}^{-2}$ 。整个测量过程历时约 30 h,并且整个测量过程为无人监管的全自动测量。滤波片的中心波长和 3 dB 带宽的 Mapping 图分别如图 4 和图 5 所示,它们都是从控制软件上直接得到的。这里的 Mapping 图采用灰度显示,图中的灰度分布反映了物理量数值大小的分布,控制软件可以用 200 个不同灰度值来区分物理量数值大小,但实际使用到的灰度值个数往往小于 200 个。Mapping 图也可以使用彩色显示,此时可以使用 1020 种不同颜色来显示物理量数值分布。图 4 中存在 7 个不同灰度值,灰度值越大,表示波长越长;灰度值越小,表示波长越短。从中心区域到 Mapping 图的边缘,灰度值由大至小的变化反映了中心波长由长至短的变化。中心区域的几个灰度值最大的点是波长最长的区域,波长为图右侧标识最大值 1550.91 nm;边缘区域的几个灰度值最小的点是波长最短的区域,波长为图右侧标识最小值 1550.52 nm。图 5 灰度值较大点表示带宽较大点,灰度值较小点表示带宽较小点。图 5 只存在 2 个不同灰度值,较大值表示测量区域的

3 dB带宽为 1.10 nm,而较小值则表示 0.99 nm。从这两张 Mapping 图上,可以清晰地看到滤波片不同区域中心波长和 3 dB 带宽的差异和变化趋势。根据 WDM 多层介质膜窄带通滤波片的制作工艺和流程<sup>[15]</sup>,可以确信测量得到的 Mapping 数据图是可靠的,而且能指导滤波片的后续工艺步骤。

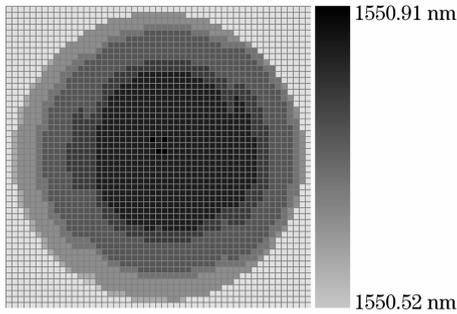


图 4 中心波长 Mapping 图

Fig. 4 Mapping image of the central wavelength

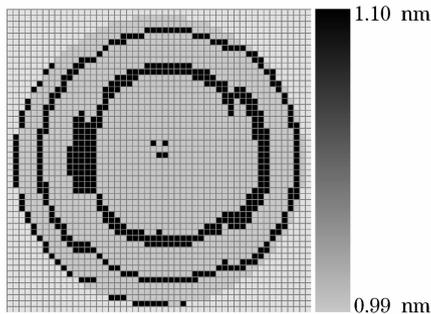


图 5 3 dB 带宽 Mapping 图

Fig. 5 Mapping image of the 3 dB bandwidth

该自动 Mapping 测量获得的数据比手动测量更加精确、丰富和全面;提供的测量结果直观,并且有多种输出模式供调用分析;同时,系统自动化程度很高,大大减少了测试人员的工作量。

## 5 结 论

设计并实现了一个光学薄膜物理特性的 Mapping 测量平台,不仅能够执行光学薄膜物理性质的全自动 Mapping 测量,而且具有可扩展性,能够通过添加设备模块来扩展平台的测量功能,使之方便地适应不同的测量需求。作为应用的例证,测量了应用于光通信系统的 WDM 滤波片的透射光谱特性,得到了该滤波片的中心波长和 3 dB 带宽等重要光学特性的 Mapping 图测量结果。

## 参 考 文 献

1 John Graham, Zoran Popovic. Capacitance based scanner for thickness mapping of thin dielectric films[J]. *Rev. Sci. Instr.*,

2000, **71**(5): 2219~2223

- 2 Chen Lei, Wang Qing, Zhu Rihong. Measurement of the homogeneity of refractive index of the germanium crystal using IR interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 404~406  
陈磊,王青,朱日宏.使用红外干涉仪测量锗材料折射率均匀性[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 404~406
- 3 Chung W. Bark, Kyung C. Cho, Yang M. Koo *et al.*. Two-dimensional mapping of triaxial strain fields in a multiferroic BiFeO<sub>3</sub> thin film using scanning x-ray microdiffraction[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(10): 102904
- 4 Peng Donggong, Wu Yonggang, Jiao Hongfei *et al.*. Design of narrowband high-reflection filter coating with wide stop band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 1001~1006  
彭东功,吴永刚,焦宏飞等.宽截止窄带高反射滤光膜设计[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 1001~1006
- 5 Wang Zhenhua, Wu Yonggang, Sang Tian *et al.*. Reflection spectra properties of guided-mode resonance filters with buffer layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1425~1428  
王振华,吴永刚,桑田等.带缓冲层的导模共振滤光片反射光谱特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1425~1428
- 6 Zhu Jingtao, Zhang Shumin, Wang Bei *et al.*. SiC/Mg multilayer film reflective mirror at 30.4 nm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 735~738  
朱京涛,张淑敏,王蓓等.30.4 nm 波长 SiC/Mg 多层膜反射镜[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 735~738
- 7 Lü Guonuan, Li Dawei, Huang Jianbing *et al.*. Design and fabrication of graded reflectivity mirrors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1240~1244  
吕国暖,李大伟,黄建兵等.渐变反射率镜的设计与制备[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1240~1244
- 8 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
- 9 Kuo Meiling, David J. Poxson, Kim Yong Sun *et al.*. Realization of a near-perfect antireflection coating for silicon solar energy utilization[J]. *Opt. Lett.* 2008, **33**(21): 2527~2529
- 10 Pan Yongqiang, Wu Zhensen, Huang Lingxia. Optical thin films interfaces roughness cross-correlated properties and light scattering[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 916~920  
潘永强,吴振森,杭凌侠.光学薄膜界面粗糙度互相关特性与光散射[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 916~920
- 11 Jonathan Corbet, Alessandro Rubini, Greg Kroah-Hartman. Linux Device Drivers[M]. 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA, USA; O'Reilly Media Inc. 2005. 2~4
- 12 Tim Boudreau, Jaroslav Tulach, Geertjan Wielenga. Rich Client Programming: Plugging into the NetBeans Platform[M]. Upper Saddle River, NJ, USA; Prentice Hall. 2007. 39~67
- 13 Liu Hengbiao, Chi Jingchun. Analysis of affecting factors on surface roughness measurement based on polychromatic speckle elongation[J]. *Acta Optica Sinica*. 2008, **28**(2): 279~284  
刘恒彪,池景春.基于多色散斑延长效应的表面粗糙度测量及影响因素分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 279~284
- 14 Gao Yi, Yang Hongliang, Zhang Fujun *et al.*. Preparation and optical characteristics of polymer DR13/PMMA composite films[J]. *Chinese J. Lasers*. 2007, **34**(7): 983~987  
高怡,杨洪亮,张福军等.聚合物复合薄膜 DR13/PMMA 的制备及其光学特性[J]. *中国激光*. 2007, **34**(7): 983~987
- 15 Chen Dayu, Zhang Rongjun, Zhu Weidan *et al.*. Study of 100 GHz narrow bandpass DWDM filters in the fiber optical communication[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, **22**(1): 75~76  
谌达宇,张荣君,朱伟丹等.光通信 DWDM 系统的 100 GHz 窄带滤波片设计和研制[J]. *红外与毫米波学报*. 2003, **22**(1): 75~76