

文章编号: 1002-2082(2007)04-0517-03

# 光学薄膜折射率和厚度测试仪检定规程解读

杨照金, 王 雷, 黎高平, 许荣国

(西安应用光学研究所, 西安, 710065)

**摘 要:** 简要介绍光学薄膜折射率和厚度测试仪检定规程的构成, 被检测量仪器的技术指标、主要检定参数和检定方法等。该规程适用于光谱椭偏法测量光学薄膜折射率和厚度的仪器, 在从事光学薄膜研究、生产和使用的单位具有广泛的应用前景。

**关键词:** 检定规程; 光学薄膜; 厚度测量; 折射率测量

中图分类号: TN741

文献标志码: C

## Explanation of verification procedure for tester of optical film refractive index and thickness

YANG Zhao-jin, WANG Lei, LI Gao-ping, XU Rong-guo

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The content of the verification procedure for testers of optical film refractive index and thickness is described. The specifications of the instrument under test, the main verification parameters and the verification method are introduced. The procedure applies to the instruments measuring the optical film refractive index and thickness by means of spectrum ellipsometry method. It has a great potential in development, production and application of optical film.

**Key words:** verification regularization; optical film; measurement of thickness; measurement of refractive index

## 引言

光学薄膜折射率和厚度测试仪检定规程于 2005 年正式发布实施。该规程的发布实施, 为开展光学薄膜主要参数计量测试, 实现光谱椭偏仪的计量检定创造了条件。规程规定了光谱范围为 250 nm~1 700 nm 的光谱椭偏法光学薄膜折射率和厚度测试仪的检定技术要求、检定项目、检定条件、检定方法、检定结果的处理和检定周期。为了使该规程早日推广使用, 也为了使光谱椭偏仪的使用单位尽快了解本标准, 本文简要介绍光学薄膜折射率和厚度测试仪检定规程的主要构成和主要参数检定方法。

## 1 检定规程的主要构成

本检定规程由如下几部分构成: 范围、受检测量器具的用途和原理、技术要求、检定条件、检定项目、检定方法、检定结果的处理和检定周期。

### 1.1 受检测量器具的用途和原理

该规程适用于用光谱椭偏法测量光学薄膜折射率和厚度的检定。因此, 在这一部分主要介绍光谱椭偏仪的工作原理、椭偏仪的构成、测量中用到的主要公式。

光谱椭偏仪的组成框图如图 1 所示。

椭偏法是利用偏振光在薄膜上下表面的反射,

通过费涅尔公式得到光学参数和偏振态之间的关系来确定薄膜的折射率和厚度<sup>[1]</sup>的。该方法准确度高且为非破坏性测量,是测量光学薄膜折射率和厚度诸多方法中最常用的一种。椭圆方位角、偏振角和相位差的关系如图2所示。

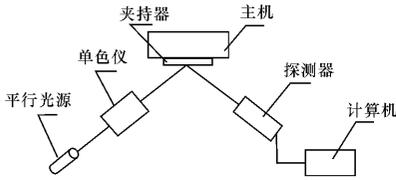
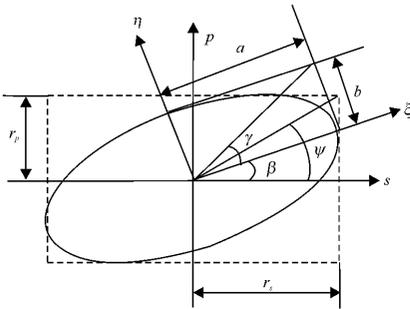


图1 光谱椭圆仪组成框图

Fig. 1 Composition of spectrum ellipsometer



$\Psi$ —偏振角;  $\gamma-\eta, \xi$  坐标系的椭圆方位角;  $\beta-s, p$  坐标系的椭圆方位角;  $a$ —椭圆的长轴半径;  $b$ —椭圆的短轴半径;  $r_s-s$  偏振方向的振幅反射系数的模;  $r_p-p$  偏振方向的振幅反射系数的模

图2 椭圆方位角、偏振角和相位差的几何关系

Fig. 2 Geometrical relation of ellipsometric azimuth angle, polarization angle and phase difference

用薄膜的椭圆函数  $\rho$  表示薄膜反射而形成椭圆偏振光的特性,如公式(1)~(4):

$$\rho = \frac{\vec{r}_p}{\vec{r}_s} = \frac{r_p}{r_s} e^{j(\varphi_p - \varphi_s)} = \text{tg} \Psi e^{j\Delta} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \vec{r}_s &= \frac{r_{1s} + r_{2s} e^{-j2\delta_1}}{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-j2\delta_1}} \\ r_{1s} &= \frac{n_0 \cos \theta_0 - n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1} \\ r_{2s} &= \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \vec{r}_p &= \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-j2\delta_1}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-j2\delta_1}} \\ r_{1p} &= \frac{n_0 / \cos \theta_0 - n_1 / \cos \theta_1}{n_0 / \cos \theta_0 + n_1 / \cos \theta_1} \\ r_{2p} &= \frac{n_1 / \cos \theta_1 - n_2 / \cos \theta_2}{n_1 / \cos \theta_1 + n_2 / \cos \theta_2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \theta_1 \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为薄膜的椭圆函数;  $\vec{r}_p$  为  $p$  偏振方向的振幅反射系数;  $\vec{r}_s$  为  $s$  偏振方向的振幅反射系数;  $r_s$  为  $s$  偏振方向的振幅反射系数的模;  $r_p$  为  $p$  偏振方向的振幅反射系数的模;  $\varphi_p$  为  $p$  偏振相位;  $\varphi_s$  为  $s$  偏振相位;  $\Psi_s$  为  $s$  偏振角;  $\Delta$  为相位差;  $r_{1s}$  为界面1的  $s$  方向偏振分量菲涅耳反射系数;  $r_{2s}$  为界面2的  $s$  方向偏振分量菲涅耳反射系数;  $\delta_1$  为被测膜层的相位厚度;  $n_0$  为空气折射率;  $\theta_0$  为空气内的入射角;  $n_1$  为薄膜折射率;  $\theta_1$  为薄膜内的入射角;  $n_2$  为基底折射率;  $\theta_2$  为基底内折射角;  $r_{1p}$  为界面1的  $p$  方向偏振分量菲涅耳反射系数;  $r_{2p}$  为界面2的  $p$  方向偏振分量菲涅耳反射系数;  $d_1$  为薄膜厚度;  $\lambda$  为光在真空中的波长。

显然,  $\Psi$  和  $\Delta$  是  $d_1, n_1, n_0, n_2, \theta_0, \theta_2, \lambda$  的函数,其中  $n_0, n_2, \theta_0, \theta_2, \lambda$  是已知参数,通过测量偏振角和相位差,由计算机求解即可得薄膜折射率和薄膜厚度。

### 1.2 技术要求

技术要求包括:外观、工作正常性和技术指标。主要技术指标:

在波长测量范围内,波长最大允许误差不超过  $\pm 0.2 \text{ nm}$ ;

入射角最大允许误差不超过  $\pm 0.02^\circ$ ;

偏振角最大允许误差不超过  $\pm 0.04^\circ$ ,相位差最大允许误差不超过  $\pm 0.08^\circ$ ;

在偏振角和相位差误差满足的条件下,折射率最大允许误差不超过  $\pm 1 \times 10^{-3}$ ,厚度最大允许误差不超过  $\pm 0.5 \text{ nm}$ 。

### 1.3 检定条件和检定用设备

检定条件包括检定环境和检定用设备。

检定用设备及要求如下:

- 1) 标准光源 汞灯、钠灯、He-Ne 激光器;
- 2) 楔形镜 顶角  $15^\circ \pm 10''$  的楔形棱镜,表面光洁;
- 3) 平行平板 平行度为  $1''$  的平行平板,表面光洁;
- 4) 标准膜片 Si 基底上镀  $\text{SiO}_2$  的单层膜,不确定度小于  $0.1 \text{ nm}$ ,表面平整光洁且无结构缺陷。

### 1.4 检定项目

检定项目及检定用主要设备见表1所示。

表1 测试仪检定项目及主要检定设备

Table 1 Verification items and main equipments of tester

序号	检定项目	主要检定设备
1	外观	—
2	工作正常性	—
3	波长最大允许误差	汞灯、钠灯、He-Ne 激光器
4	入射角最大允许误差	平行平板、楔形镜
5	偏振角和相位差最大允许误差	—
6	折射率和厚度最大允许误差	标准膜片

### 1.5 检定内容

主要介绍波长最大允许误差、入射角最大允许误差、偏振角和相位差最大允许误差、折射率和厚度最大允许误差的检定方法。

## 2 检定方法

### 2.1 波长最大允许误差

用标准光源代替椭偏仪的光源位置,待标准光源正常工作 5 min 后,用其检定波长。由短波方向至长波方向变换波长,在 365.02 nm,404.66 nm,407.78 nm,435.83 nm,546.07 nm,576.96 nm,579.07 nm,589.6 nm,632.8 nm 波长处,分别用探测器接收标准光源的出射光强,记录光强最强处的波长示值与标准谱线波长之差,测量 3 次,取算术平均值。

### 2.2 入射角最大允许误差

将平行平板放置于被测样品的位置,椭偏仪入射光对准平行平板的前表面,调整样品台,使经过平行平板前表面反射回的光束自准直。取掉平行平板,将一楔形镜放置在样品台上,根据楔形镜角度值选择适当的入射角,调整入射角的角度,使经过楔形镜前表面反射回的光束自准直,按公式(5)计算角度误差:

$$\delta_a = \alpha_0 - \alpha \quad (5)$$

式中:  $\delta_a$  为角度误差,单位为度( $^{\circ}$ );  $\alpha_0$  为楔形镜角度值,单位为度( $^{\circ}$ );  $\alpha$  为角度测量值,单位为度

( $^{\circ}$ )。测量 3 次,取算术平均值作为测量结果。

### 2.3 偏振角和相位差最大允许误差

采用空气测量法,取入射角为  $90^{\circ}$ ,测量空气的偏振角和相位差:按公式(6)计算偏振角误差,按公式(7)计算相位差误差。

$$\delta_{\Psi} = \Psi_m - 45^{\circ} \quad (6)$$

式中:  $\delta_{\Psi}$  为偏振角误差,单位为度( $^{\circ}$ );  $\Psi_m$  为测量得到偏离  $45^{\circ}$  的最大的偏振角值,单位为度( $^{\circ}$ )。

$$\delta_{\Delta} = \Delta_m \quad (7)$$

式中:  $\delta_{\Delta}$  为相位差误差,单位为度( $^{\circ}$ );  $\Delta_m$  为测量得到相位差的最大偏差值,单位为度( $^{\circ}$ )。

### 2.4 折射率和厚度最大允许误差

将标准膜片安装在测试仪上,取入射角为  $75^{\circ}$ ,测量折射率和厚度,测量 6 次,按公式(8)计算折射率误差,按公式(9)计算厚度误差。

$$\delta_n = \bar{n} - n_{01} \quad (8)$$

式中:  $\delta_n$  为折射率误差;  $\bar{n}$  为测量 6 次得到的折射率的算术平均值;  $n_{01}$  为标准膜片的折射率值。

$$\delta_d = \bar{d} - d_0 \quad (9)$$

式中:  $\delta_d$  为厚度误差,单位为 nm;  $\bar{d}$  为测量 6 次得到的厚度算术平均值,单位为 nm;  $d_0$  为标准膜片的厚度值,单位为 nm。

## 3 结束语

笔者简要介绍了 GJB/J 5463-2005 光学薄膜折射率和厚度测试仪检定规程的主要构成和检定方法,重点介绍了光谱椭偏仪的工作原理,光谱椭偏仪的主要技术指标,主要检定用设备和主要参数检定方法。应当注意:本文只是对标准的简要介绍,要开展计量检定工作,还是要以标准正式文本为准。

### 参考文献:

- [1] 苏大图. 光学测试技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.