

## 低折射率薄膜光学参数的测量

周九林 邓晓玲\*

借助高精度低反射率计和简单的数学处理,便能测出低折射率薄膜的折射率及其色散。

### 一、引言

本文讨论低折射率的透明薄膜。

薄膜的几何厚度、折射率及其色散,是设计光学膜系的重要参数。文献[1]提出了单波长椭圆仪与透射式分光光度计相结合的测量方法,但对于低折射率薄膜,这种方法的误差就变得明显起来。

本文利用现有的单波长(6328Å)椭圆仪(JT75-1型)测出薄膜的几何厚度 $d$ ,再用低反射率计WFF30测得薄膜反射率 $R$ 与波长 $\lambda$ 的关系,然后用TexasTi-59台式计算器进行简单的数据处理,便得到薄膜折射率的通用色散关系。

由于低反射率计的功能是精确测量表面的低反射率值,所以这种方法对低折射率薄膜特别有效。下面的分析将表明,这种方法的测量精度,对于薄膜设计的实际需要来说,已足够精确。

### 二、测量方法

如图1所示,设有折射率为 $n_1$ 、几何厚度为 $d$ 的透明薄膜镀于楔形玻璃基底上,基底玻璃的折射率为 $n_2$ 。在空气中测量,镀膜表面的反射率为[2]

$$R_1 = \frac{(\eta_0 - \eta_2)^2 \cos^2 \delta + [(\eta_0 \eta_2 / \eta_1)]^2 \sin^2 \delta}{(\eta_0 + \eta_2)^2 \cos^2 \delta + [(\eta_0 \eta_2 / n_0) + \eta_2]^2 \sin^2 \delta} \quad (1)$$

式中,  $\delta$  是薄膜的相位厚度,  $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d \cos \theta_1$  (2)

$\lambda$  是测量光束的波长,  $\eta_0, \eta_1, \eta_2$  是空气、薄膜、玻璃的光纳。由于在反射率的实际测量

收稿日期: 1985年10月24。

\*北京工业学院实习生。

中，测量光束总是倾斜投射到待测表面（在WFF50低反射率计中，入射角 $\theta_0$ 为 $15^\circ$ ），而在低折射率薄膜的情形，偏振效应必须考虑，因此在公式（1）中用了更一般形式的光纳代替折射率。

对于p偏振光

$$\begin{aligned} \eta_{op} &= 1 / \cos\theta_0 \\ \eta_{1p} &= n_1 / \cos\theta_1 \\ \eta_{rp} &= n_r / \cos\theta_r \end{aligned} \quad (3)$$

对于s偏振光

$$\begin{aligned} \eta_{os} &= \cos\theta_0 \\ \eta_{1s} &= n_1 \cos\theta_1 \\ \eta_{rs} &= n_r \cos\theta_r \end{aligned} \quad (4)$$

$\theta_0$ 、 $\theta_1$ 和 $\theta_r$ 满足斯涅耳关系

$$n_0 \sin\theta_0 = n_1 \sin\theta_1 = n_r \sin\theta_r \quad (5)$$

实际测得的反射率乃是两种偏振分量的平均值

$$R = \frac{1}{2} (R_p + R_s) \quad (6)$$

将式（3）和式（4）分别代入式（1），便得到 $R_p$ 和 $R_s$ 。

由式（1）~（6）可知，薄膜的反射率 $R$ 是 $\lambda$ 、 $\theta_0$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 和 $d$ 的函数。但其中基底玻璃的折射率 $n_2$ 是已知的，例如 $K_9$ 玻璃

$$\begin{aligned} n_2^2 &= A_0 + A_1 \lambda^2 + A_2 \lambda^{-2} + A_3 \lambda^{-4} + A_4 \lambda^{-6} \quad (7) \\ A_0 &= 2.269185; A_1 = -9.449785 \times 10^{-8} \\ A_2 &= 1.163685 \times 10^{-2}; A_3 = -1.138036 \times 10^{-4}; \\ A_4 &= 4.419505 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

测量光束的入射角 $\theta_0$ 是仪器给定的。如果我们用单波长椭圆偏仪测出薄膜的几何厚度 $d$ ，然后用低反射率计逐点测出薄膜的光谱反射率 $R \sim \lambda$ ，那么在 $R$ 所依赖的各参数中，唯一的未知参

表1 BaK<sub>7</sub>玻璃及石英玻璃表面反射率的校验测量

BaK<sub>7</sub>玻璃

测量波长 ( $\mu\text{m}$ )	K <sub>9</sub> 玻璃定 标值R(%)	BaK <sub>7</sub> 玻璃		测量波长 ( $\mu\text{m}$ )	K <sub>9</sub> 玻璃定 标值R(%)	BaK <sub>7</sub> 玻璃	
		理论计算值 R(%)	实测值 R(%)			理论计算值 R(%)	实测值 R(%)
0.68	4.18	4.86	4.75	0.92	4.11	4.78	4.70
0.72	4.18	4.84	4.73	0.96	4.11	4.77	4.70
0.76	4.15	4.83	4.73	1.00	4.10	4.76	4.70
0.80	4.14	4.81	4.73	1.04	4.09	4.76	4.70
0.84	4.13	4.80	4.72	1.08	4.09	4.75	4.70
0.88	4.12	4.79	4.71	1.12	4.08	4.74	4.69

测量波长 (μm)	K <sub>9</sub> 玻璃定标值 R (%)	石 英 玻 璃	
		理论计算值 R (%)	实测值 R (%)
0.5893	4.22	3.49	3.45
0.6563	4.19	3.46	3.44
0.8630	4.13	3.41	3.40
0.9508	4.11	3.40	3.38
1.0	4.10	3.39	3.38

数  $n_1(\lambda)$ ，即薄膜的折射率及其色散，就可以通过式 (1)~(7) 解算出来。

在实际测量中，为了减小椭偏仪的系统误差，先用 K<sub>9</sub> 玻璃片对仪器进行校准，此外，为了校验低反射率计 WFF30 的测量准确度，采用 BaK<sub>7</sub> 玻璃和石英玻璃表面作试样测量。其结果列于表 1。表中将 K<sub>9</sub> 玻璃表面 (3 级光洁度) 的反射率作为定标值，其值按下述公式算出

$$R_g = R_0 = (1 - n_g)^2 / (1 + n_g)^2 \quad (8)$$

式中， $n_g$  由式 (7) 取值。

由表 1 可见，低反射率计 WFF30 对于折射率高于 1.52 的 BaK<sub>7</sub> 玻璃，准确度可达 0.001，而对于折射率低于 1.52 的石英玻璃，准确度优于 0.0005，足见对低折射率材料的测量更为有利。

### 三、测量结果及数据处理

利用上述方法，我们测量了真空热蒸镀的 SiO<sub>2</sub> 薄膜的折射率，其结果列于表 2，并示于图 2。也对其它低折射率薄膜 CaF<sub>2</sub>、MgF<sub>2</sub> 进行了测量。

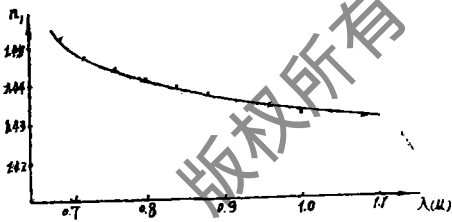


图 2 SiO<sub>2</sub> 薄膜折射率的色散曲线

对于每个测量波长  $\lambda$ ，为了从实测值  $R$  和其它已知参数  $\theta_0$ 、 $n_g$ 、 $d$  解算出对应的薄膜折射率  $n_1$ ，我们根据公式 (1)~(7)，在台式计算器 Texas Ti-59 上编制一套解算  $n_1$  的程序。在解算过程中，如果假设的输入值  $n_1$ ，使得按公式 (1)~(7) 计算的  $R'$  与实测值  $R$  相差的绝对值小于 0.0005，那末这一输入值  $n_1$  即被认为是所寻求的解算值。

表 2 SiO<sub>2</sub> 薄膜的实测反射率  $R$  及其解算的折射率  $n_1$

$\lambda(\mu\text{m})$	0.68	0.72	0.76	0.8	0.84	0.88	0.92	0.96	1.0	1.04	1.08
$R(\%)$	2.93	2.85	2.81	2.79	2.79	2.81	2.82	2.86	2.88	2.92	2.96
$n_1$	1.452	1.447	1.444	1.441	1.439	1.437	1.443	1.434	1.432	1.432	1.431

$$d = 0.1352\mu\text{m}$$

## 激光半导体探测器的脉冲时间钳定装置

描述了一种供光测距仪用的半导体探测器的脉冲时间钳定装置。本装置在输出端形成标准的晶体管-晶体管逻辑脉冲,脉冲前沿由确定的输入脉冲相位的到达时刻确定。当前沿为30ns、脉宽为100ns时,在0.3~6V的幅度范围里,钳定精度为1ns。

光脉冲法测距的精度在很大程度上取决于测量探测器得到的脉冲之间的时间间隔精度。

从各个实测点的 $R \sim \lambda$ 关系,逐点解算出相应的 $n_1 \sim \lambda$ ,列于表2的末行。当然,也可以象文献[1]那样,按照塞尔默(Sallmeir)型色散方程[3]

$$n^2 = A + B/\lambda^2 \quad (9)$$

求出通用的色散常数A和B。

### 四、误差估算

要从公式(1)求出测量误差的解析表示式,是相当艰难的。我们用数字计算方法,给出所引具体实例的误差值。从(1)式可知,误差同膜层的相位厚度 $\delta$ 有关。我们选取两个典型的 $\delta$ 值进行计算。其一, $\delta$ 接近 $\frac{\pi}{2}$ ,对应波长点 $0.76\mu\text{m}$ ;其二, $\delta$ 远离 $\frac{\pi}{2}$ ,对应波长点 $1.08\mu\text{m}$ 。

误差来源有两个,一是对R的测量误差 $\Delta R$ ,如上所述, $\Delta R \leq 0.0005$ ,二是薄膜几何厚度d的测量误差 $\Delta d$ ,典型的 $\Delta d$ 值为 $\pm 10\text{\AA}$ 。我们按非相关误差计算,以便估计最大误差值。其结果列于表3。

表3 SiO<sub>2</sub>薄膜的折射率误差计算值

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$R + \Delta R$	$n_1 + \Delta n_1$	$(d + \Delta d)$ $\mu\text{m}$	$n_1 + \Delta n_1$
0.76	$0.0281 + 0.0005$	$1.444 + 0.01$	$0.1352 + 0.001$	$1.444 + 0.008$
1.08	$0.0296 + 0.0005$	$1.431 + 0.014$	$0.1352 + 0.001$	$1.431 + 0.012$

由表可见, SiO<sub>2</sub>薄膜的测量误差在1%左右。

### 参 考 文 献

- [1] 周九林,《光学学报》,1985年,第5期。
- [2] 周九林 尹树百译,《光学薄膜技术》,国防工业出版社,1974年,第57页。
- [3] P. Baumeister, Appl. Opt., 1979, Vol. 18, P. 111.