第5卷 第5期
1985年5月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 5, No. 5
May, 1985

光学透明薄膜折射率色散的测量

周 九 林
(西南技术物理研究所)

提 要

用单波长椭圆偏光仪与分光光度计相结合，构成一种简便实用的测量方法，可以测出常用介质薄膜在任一波长的折射率。分析指出，适当选择薄膜的位相厚度，可使折射率测量误差$<1\times10^{-2}$，这对通常的膜系设计和镀制已足够精确。

薄膜的折射率是光学膜系设计中的一个重要参数。文献[1～3]提出一系列精确的测量方法，但需要专门的仪器，并且也仅能测出薄膜在波长6328 Å 的折射率。有人[4,5]根据薄膜的光谱透射率曲线来确定薄膜折射率的色散，前者[4]用图象求解，需要经验，颇为费时，后者[5]需用双基片，两者的精确度都不可能很高。

本方法的基本思路是：用单波长椭圆偏光仪(例如JT75-1)测出薄膜的几何厚度d，然后用分光光度计测出不同波长的薄膜透射率T_f(或反射率R_f)，据此求出薄膜对不同波长的折射率值，最后通过塞尔默(Sellmeir)型色散方程[6]，定出通用的色散常数A和B。

一、基本公式及测量方法

设折射率为n的介质薄膜，镀在折射率为n_g的透明基片上，如图1所示。对于垂直入射的波长为λ的单色光，薄膜的透射率为[7]

$$T_f=\frac{4n_0n_gn^2}{n^2(n_0+n_g)^2-(n_g^2-n^2)(n^2-n_0^2)\sin^2x}, \tag{1}$$

式中n_0为入射媒质空气的折射率，$n_0=1$，$x=2\pi nd/\lambda$为薄膜的位相厚度，d为薄膜的几何厚度。由(1)式可见，薄膜的透射率T_f是n、d、n_g和λ的函数。如果基片材料用K_9玻璃，那么对于任一波长λ，其折射率n_g是精确已知的[8]：

$$n_g^2=A_0+A_1\lambda^2+A_2\lambda^{-2}+A_3\lambda^{-4}+A_4\lambda^{-6}+A_5\lambda^{-8}, \tag{2}$$

式中A_0, A_1, …, A_5为已知常数。

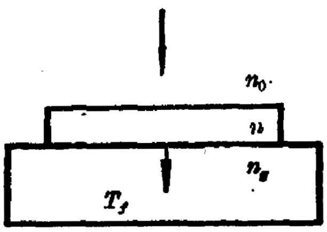

图 1

我们利用单波长椭圆偏光仪，可以相当精确地测出薄膜的几何厚度d，以及薄膜在波长6328 Å 的折射率n^*。然后用分光光度计测定薄膜对不同波长的透射率T_f。对于一个特定的波长，n_g、d、T_f和λ都是已知数，唯一的未知数就是相应于这一波长的薄膜折射率n。根据(1)式，n值是完全确定的。

在用分光光度计测量薄膜的透射率时，为了消除镀膜玻璃基片背面反射的影响，应在光

收稿日期：1984年4月17日；收到修改稿日期：1984年12月3日

度计的参考光路中放置同牌号 K_9 玻璃的光洁基片。这时，测得的总透射率 T_m 与镀膜界面的透射率 T_f 有如下关系[9]：

$$T_f=T_m\frac{(1-R)}{1+R(1-T_m)},\tag{3}$$

式中 R 为空气/基片界面的光谱反射率：

$$R=\frac{(1-n_g)^2}{(1+n_g)^2},\tag{4}$$

归结起来，测量步骤如下：

(1) 将薄膜镀在已知折射率的基片上；

(2) 用单波长椭圆偏光仪测出薄膜的几何厚度 d 和对 6328 Å 的折射率 n^*；

(3) 将镀膜基片放入分光光度计的测量光路，同时在参考光路放置同种材料的光洁基片，在所关注的波段内，精确测出几个波长处的透射率 $T_m(\lambda)$。

二、数 据 处 理

由已知数据 d 和 $T_m(\lambda)$，根据公式 (1)～(4)，用普通小型台式计算器，例如 Texas Instrument 公司的 TI59，便能迅速解算出薄膜的折射率 $n(\lambda)$。

为了消除测量的偶然误差，我们在所关注的波段内，测量多个波长的 $T_m(\lambda)$ 值，用计算器解出相应的 $n(\lambda)$ 值，然后假定薄膜的折射率遵从塞尔默型色散方程[6]

$$n^2(\lambda)=A+B/\lambda^2,\tag{5}$$

式中 A 和 B 为色散常数。我们以椭圆偏光仪测得的薄膜对 6328 Å 的折射率 n^*，作为确定常数 A 和 B 的“基准点”，即

$$(n^*)^2=A+B/0.6328^2。\tag{6}$$

对于每一个实际测得的 $n_i(\lambda)$ 值，均代入公式(5)并与式(6)联立解出相应的 A_i 和 B_i，然后对这些 A_i 和 B_i 分别求取平均值 $\bar{A}$ 和 $\bar{B}$，作为薄膜的通用色散常数。

表 1 列出了 TiO_2-Ta_2O_5 混合物薄膜的实测数据。

表 1 TiO_2-Ta_2O_5 混合物薄膜的实测折射率色散数据

Table 1 The experimental data of a TiO_2-Ta_2O_5 film

		$d=0.074\mu$		$n^*=2.22$	
$\lambda(\mu)$	$T_m\%$	n	A	$B(\mu^2)$	$n_a=\sqrt{\bar{A}+\bar{B}/\lambda^2}$
0.91	83.2	2.114	4.0383	0.3566	2.114
0.96	84.7	2.100	4.0112	0.3675	2.104
1.01	85.6	2.096	4.0470	0.3532	2.095
1.06	86.5	2.088	4.0446	0.3541	2.088
1.11	87.4	2.082	4.0486	0.3525	2.081
1.16	88.4	2.076	4.0474	0.3530	2.075
1.21	89.0	2.072	4.0538	0.3504	2.070
1.26	89.8	2.066	4.0445	0.3537	2.065
			$\bar{A}=4.0419$	$\bar{B}=0.3551$	

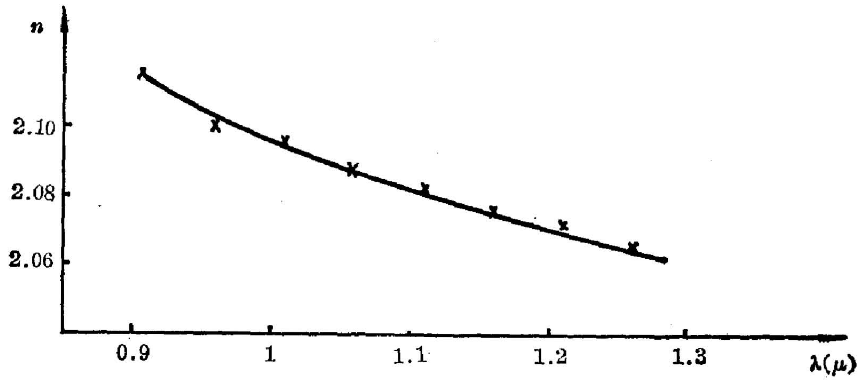

图 2　TiO_2-Ta_2O_5 混合物薄膜的折射率色散曲线

Fig. 2　Dispersion curve of a TiO_2-Ta_2O_5 film

图 2 示出这种掺混氧化物薄膜的折射率色散曲线。图 2 中曲线按 $n^2=(\bar{A}+\bar{B})/\lambda^2$ 作出，"×"系实验测量值。

三、误差分析

在上述测量过程中，波长 λ 的测量精度为 ±4 Å(例如分光光度计 UV-365)，薄膜几何厚度 d 的测量精度为 ±10 Å(例如椭偏仪 JT75-1)，因此可以认为，薄膜折射率 n 的测量误差，是由透射率 T_f 的测量误差所引起的。

将式(1)变换为

$$(1/T_f)=C-F(n,\ x), \tag{7}$$

式中

$$\left.\begin{aligned}&F(n,\ x)=F_1(n)\sin^2 x,\qquad C=(1+n_g)^2/4n_g,\\&F_1(n)=(n_g^2-n^2)(n^2-1)/4n_gn^2。\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

(7)式对 n 求微分，得

$$\Delta n=(\Delta T_f/T_f)E(n,\ x)。 \tag{9}$$

(9) 式便是我们分析误差的数量依据。其中 $E(n,\ x)$ 称为误差因子，

$$\left.\begin{aligned}&E(n,\ x)=[C-F(n,\ x)]/F'_n,\\&F'_n=F_1\sin^2 x+2(xF_1/n)\sin x\cos x,\\&F'_1=(n_g^2-n^4)/2n_gn^3。\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

如果我们选定基片材料，例如 K_9 玻璃，并略去其折射率 n_g 的微弱色散，那么误差因子 $E(n,\ x)$ 可以通过式 (8) 和(10)计算出来。图 3 给出误差因子的绝对值 $|E|$ 与薄膜位相厚度 x 的关系。

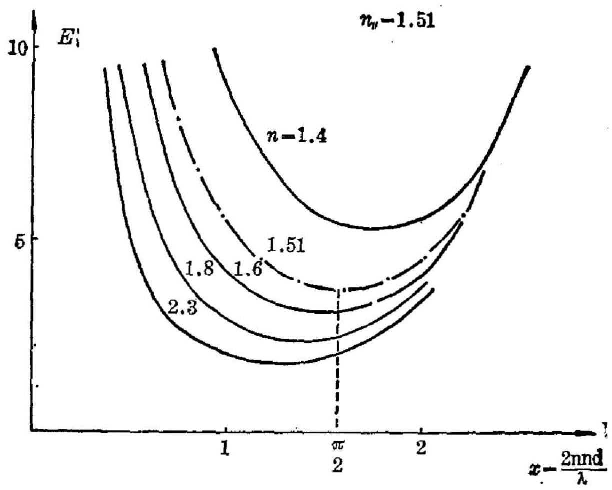

图 3　误差因子绝对值 $|E|$ 与薄膜位相厚度 x 的关系

Fig. 3　Dependence of the absolute value of error factor upon phase thickness

由图 3 可见：

(1) 对于每一种折射率值 n，待测薄膜的位相厚度都有一个最佳值 $x_{最佳}$，此时误差因子

的绝对值 $|E|$ 为最小。当 $n=1.4\sim2.3$，则 $x_{最佳}$ 在 $1\sim1.8$ 范围。当 $n<n_g$，则 $x_{最佳}>\frac{\pi}{2}$；而当 $n>n_g$，则 $x_{最佳}<\frac{\pi}{2}$。

(2) 当 n 取值范围为 $1.4\sim2.3$，则误差因子绝对值的最小值 $|E|_{\min}$ 约为 $2\sim5$。

(3) 双光路分光光度计单点测量的精度可为 $(\Delta T_f/T_f)=0.002$，由(9)式算得折射率测量误差为

$$\Delta n=(\Delta T_f/T_f)|E|_{\min}=(0.4\sim1)\times10^{-2}, \tag{11}$$

这对通常的薄膜设计和镀制已足够精确。

(4) 用这种方法测量折射率高于基片的的薄膜，其精度相对更高。

四、简短的讨论

(1) 本文的标题是"光学透明薄膜"，因此没有考虑薄膜材料的吸收。对镀在 K_9 玻璃上的单层吸收薄膜进行计算表明，若 $n=1.6$，消光系数 $k=0.001$，$nd=(1/4)\times1.06\,\mu m$，则薄膜的吸收率 $A=0.001833$；若 $n=2.3$，$k=0.001$，$nd=(1/4)\times1.06\,\mu m$，则

$$A=0.001026。$$

可见吸收率 A 都在透射率的测量误差范围以内。因此，本文所述方法的适用范围是这样的薄膜材料：它们的消光系数 k 使得受检测的单层膜的吸收率 $A<0.002$(透射率测量精度)。

(2) 本文没有考虑薄膜的非均匀性。严重非均匀性的薄膜通常是不采用的。

参 考 文 献

[1] A. Konova *et al.*; *Thin Solid Films*, 1975, **27**, No. 1 (May), 83.
[2] R. Th. Kersten; *Opt. Commun.*, 1975, **13**, No. 3 (May), 327.
[3] В. Н. Яериаев *и др.*; *ОМП* 1975, № 12 (Дек), 38.
[4] В. К. Милославский *и др.*; *Оптика и Спектр.*, 1980, **48**, № 3 (Мар), 619.
[5] Г. В. Пателеев; *Оптика и Спектр.*, 1982, **53**, № 2 (Авг), 331.
[6] P. Baumeister; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 1 (Jan), 111.
[7] A. Vasicek; «*Optics of Thin Films*», (North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1960), 123.
[8] «光学仪器设计手册»(上册)(国防工业出版社, 1971), 421.
[9] J. M. Bennet, E. J. Ashley; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, No. 8 (Aug), 1749.

Measurement of refractive-index dispersion of transparent films

ZHOU JIULIN
(*Chengdu Southwest Technical Physics Institute*)

(Received 17 April 1984; revised 3 December 1984)

Abstract

Combining a single-wavelength ellipsometer with a spectrophotometer, we propose a method to measure refractive indices of dielectric films at any wavelength. With phase thickness of the thin film properly selected, the error of the measurement may be as low as $<1\times10^{-2}$, enough for the usual thin-film design and deposition.