

# 测量薄膜材料 $n$ 、 $k$ 、 $d$ 的一种简单方法

张凤山 朱玲心 王寿英

(中国科学院上海技术物理研究所)

**摘要**——本文介绍一种测定薄膜材料光学参数的简单方法, 该方法根据透过率极值与  $n$ 、 $k$ 、 $d$  之间的关系算出  $n$ 、 $k$ 、 $d$  值。用小型计算机很容易实现这个计算。

## 一、引 言

薄膜材料的折射率  $n$ 、消光系数  $k$  和厚度  $d$  是设计薄膜光学器件必不可少的三个参量。目前国内大多数薄膜工作者都采用大块材料的  $n$ 、 $k$  值代用, 或者引用文献中给出的数据, 这些数据与薄膜实际的  $n$ 、 $d$ 、 $k$  值有所偏离, 这必然会影响到薄膜器件的设计和制备。所以, 测定薄膜的  $n$ 、 $k$ 、 $d$  值对薄膜工作者是具有重要意义的。目前测定这些参量采用的方法有椭圆偏光测量法<sup>[1~4]</sup>、测布鲁斯特角方法<sup>[5]</sup>、干涉测量法<sup>[6]</sup>、光度测量法<sup>[7,8]</sup>及遗漏波导方法等等。但这些方法都必须建立相应的设备, 对于红外波段来说, 由于信号较弱, 要取得好的测量精度是相当困难的。本文将论述一种简单的测量方法、用分光光度计测出单层介质膜的透射光谱曲线, 然后把数据输入微型计算机进行处理, 以确定光学薄膜的  $n$ 、 $k$ 、 $d$  值。此方法不必建立相应的测试设备, 简单易行,  $n$  的精度可达 1.5%, 已足以满足光学薄膜器件设计的要求。

## 二、原 理

光在透明薄膜中会产生干涉, 通过薄膜的透过率为

$$T = \frac{4n_s n_0}{|n_0 B + C|^2}, \quad (1)$$

其中  $\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta & i \sin \delta / N \\ i N \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ n_s \end{pmatrix}$ ,  $\delta = 2\pi N d / \lambda$ ,  $N = n - iK$ ,  $n_0$ 、 $n_s$  分别为空气和基片的折射率,  $\lambda$  为入射波长。由式(1)可知  $T$  是  $n_0$ 、 $n_s$ 、 $n$ 、 $k$  和  $d$  的函数。如果考虑到基片另一个表面反射的影响, 那么, 最终透过率为

$$T_s = \frac{T(1 - R_s^+) A_s}{1 - R^- R_s^+ A_s^2}, \quad (2)$$

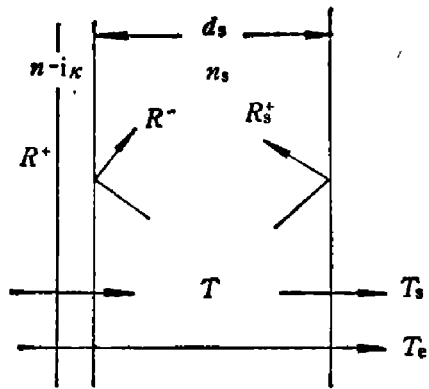


图 1 基片两面透射和反射示意图  
Fig. 1 The transmittance and reflectance on two sides of the substrate

其中  $R^-$ 、 $R_s^+$  分别为基片两个表面的反射率,

$$R_s^+ = \frac{(n_s - 1)^2 + K_s^2}{(n_s + 1)^2 + K_s^2};$$

$A_s$ 、 $K_s$ 、 $d_s$  分别为基片的吸收、消光系数和厚度,

$$A_s = e^{-(4\pi K_s d_s / \lambda)}.$$

参看图 1。

图 2 是镀制在硅基片上的碲化铅薄膜透射光谱曲线。原则上我们只要通过改变  $n$ 、 $k$ 、 $d$  计算得的透过率值去拟合这条光谱曲线,便能确定唯一的  $n$ 、 $k$ 、 $d$  值。但这需要使用大型计算机处理大量的数据,计算量是很可观的,有必要予以简化。由于测量的是弱吸收镀膜材料,所以当波长  $\lambda = 4nd/m$  ( $m$  为正整数)时,  $T$  (或  $T_s$ ) 出现极值,这样,我们只要拟合极值  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  便能确定唯一的  $n$ 、 $k$ 、 $d$  值,减小了计算量,用小型计算机即可完成计算。

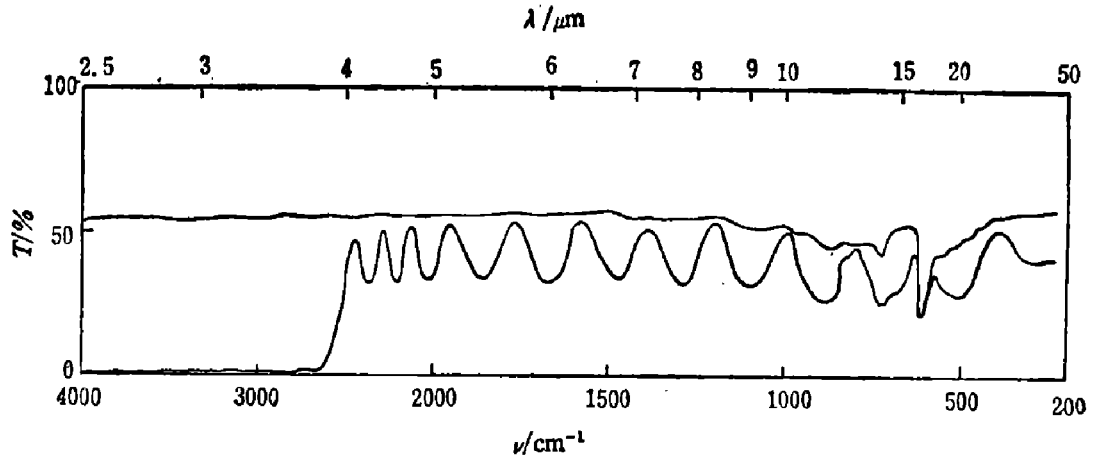


图 2 硅基片上碲化铅薄膜的透射光谱

Fig. 2 Transmittance spectrum of the lead telluride coating on silicon substrate

### 三、处理方法

为测试某种薄膜的  $n$ 、 $k$ 、 $d$  值,我们首先在一块基片上镀制一定厚度的这种单层薄膜样片。然后用分光光度计测出薄膜样片的光谱曲线,并查出极值透过率  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  相应的波长  $\lambda$  和级次,再使用编制好的程序输入计算机计算,得到所需的  $n$ 、 $k$ 、 $d$  值。计算机方框图见下页。

计算时,首先修正基片一个面反射的影响,若用小型计算机同时拟合一系列  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  值是比较困难的,难以收敛到所要求的程度。由薄膜光学理论得知,对于镀在硅基片或锗基片上的碲化铅薄膜来说,膜层光学厚度为  $\lambda/4$  整数倍的那些波长点具有透过率极值。当膜层光学厚度是  $\lambda/4$  的偶数倍时,透射率为极大值,若无吸收时,这些极值等于基片的透射率,所以  $T_{\max}$  对  $k$  的变化比较灵敏。由于测的是弱吸收材料,  $k$  对透射率的影响很小,相对而言,  $T_{\min}$  对  $n$  的变化则比较敏感。

图 3 和图 4 分别为薄膜透射率的极大值  $T_{\max}$  和极小值  $T_{\min}$  随  $n$  和  $k$  的理论变化曲线。

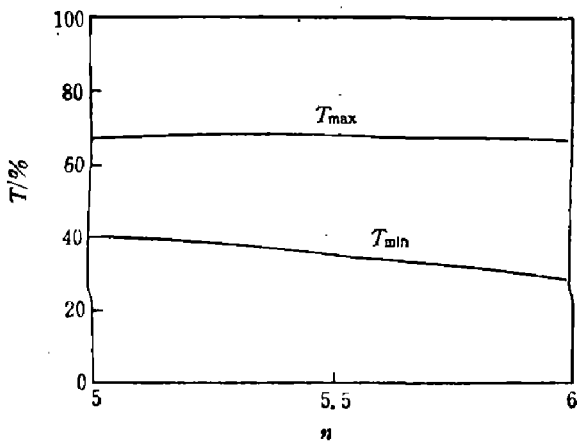
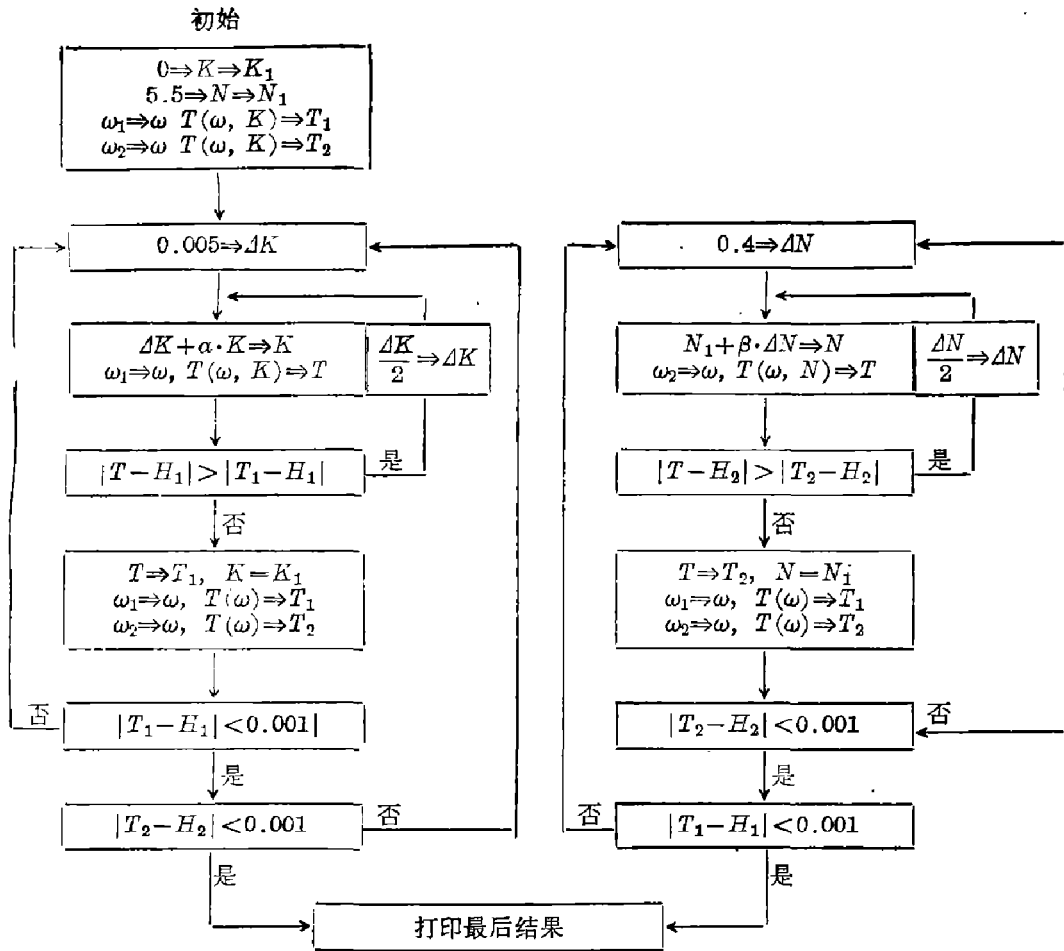


图3 薄膜  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  随  $n$  的理论变化曲线  
( $K=0.01, n_s=3.42, K_s=0$ )

Fig. 3 Variation of  $T_{\max}$  and  $T_{\min}$  with  $n$  of film ( $K=0.01, n_s=3.42, K_s=0$ )

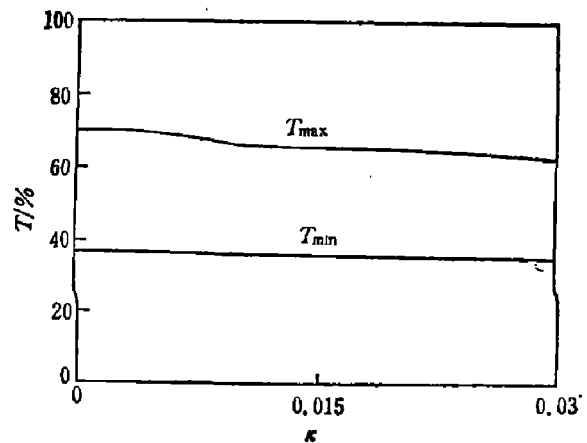


图4 薄膜的  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  随  $k$  的变化曲线  
( $n=5.5, n_s=3.42, K_s=0$ )

Fig. 4 Variation of  $T_{\max}$  and  $T_{\min}$  with  $k$  of film ( $n=5.5, n_s=3.42, K_s=0$ )

基片材料的折射率  $n_s=3.42$ 。图5为无支撑的低折射率薄膜的  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  随  $n$  的变化曲线。由于  $K=0$ , 所以  $T_{\max}$  与 100% 线重合。

我们采用逐个拟合的方法, 即改变  $k$  去拟合  $T_{\max}$  值, 然后改变  $n$  去拟合  $T_{\min}$  值, 反复迭代到所要求的精度, 即可同时满足  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  的要求, 这样就把二维问题简化为一维问题了, 不仅方法简单, 而且加快了收敛速度, 收到了较好的效果。

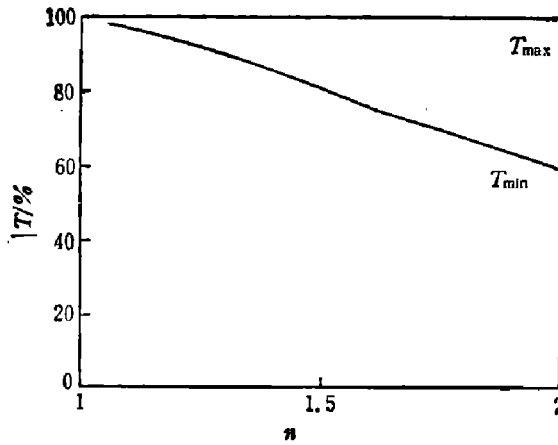


图5 薄膜  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  随  $n$  的变化曲线 ( $k=0$ , 无支撑薄膜)

Fig. 5 Variation of  $T_{\max}$  and  $T_{\min}$  with  $n$  of film ( $k=0$ , no substrate)

由于采用逐点拟合的办法, 没有必要预先确定色散模式, 所求出的  $n$ 、 $k$ 、 $d$  都是  $\lambda$  的函数, 由于  $d$  应是相同的, 所以我们对所求出的  $d$  值求平均, 以更接近光学薄膜真正的厚度。考虑到一般分光光度计的波长精度优于透过率精度, 再用平均  $d$  代入  $nd = \frac{\lambda}{4} \cdot m$  式, 求出  $n$  值, 此时求得的  $n$  值更接近于真实值。

#### 四、结果分析

表1~5分别列示了碲化铅、云母、硫化锌、硒化锌和锗薄膜的  $n$ 、 $k$  (此处  $k$  是透射光的损耗, 包括吸收和散射) 值。从图3、4、5可知折射率和吸收系数的测量误差因材料不同而有差别。 $\frac{\partial T_{\max}}{\partial n}$  和  $\frac{\partial T_{\min}}{\partial k}$  值愈大, 给出的  $n$ 、 $k$  值误差越小。如以分光光度计测透射率误差0.5%为标准, 理论计算表明, 对于硅基片 ( $n_s=3.42$ ) 上的碲化铅薄膜 ( $n=5.5$ ,  $k \approx 0.01 \sim 0.02$ ), 其  $\frac{\Delta n}{n} \approx 1\%$ 、 $\frac{\Delta k}{k} \approx 10\%$ 、 $\frac{\Delta d}{d} \approx 2\%$ 。而对于无衬底的云母片 ( $n=1.4$ ), 则  $\frac{\Delta n}{n} = 0.7\%$ 。

表1 碲化铅薄膜的  $n$ 、 $k$  值

Table 1 Values of  $n$ 、 $k$  of the lead telluride coating

$d=4.08\mu\text{m}$ (锗基底)		
$\lambda(\mu\text{m})$	$n$	$k$
14.60	5.37	0.0256
11.20	5.49	0.0150
9.00	5.51	0.0094
7.56	5.56	0.0069
6.56	5.62	0.0072
5.75	5.64	0.0056
5.16	5.68	0.0044
4.70	5.76	0.0041

表2 云母片的  $n, k$  值

Table 2 Values of  $n, k$  of the piece of mica

$d=6.83 \mu\text{m}$ (无衬底)		
$\lambda(\mu\text{m})$	$n$	$k$
1.05	1.540	0.00018
1.00	1.542	0.00018
0.96	1.542	0.00023
0.92	1.544	0.00023
0.88	1.544	0.00023
0.84	1.544	0.00023
0.81	1.543	0.00025

表3 硫化锌薄膜的  $n, k$  值

Table 3 Values of  $n, k$  of the zinc sulphide coating

$d=3.75 \mu\text{m}$ (硅基底)		
$\lambda(\mu\text{m})$	$n$	$k$
5.63	2.252	0.000010
4.23	2.256	0.000625
3.40	2.266	0.000313
2.84	2.272	0.000469

表4 硒化锌薄膜的  $n, k$  值

Table 4 Values of  $n, k$  of the zinc Selenide coating

$d=7.35 \mu\text{m}$ (硅基底)		
$\lambda(\mu\text{m})$	$n$	$k$
6.05	2.46	0.000312
5.18	2.46	0.000312
4.53	2.46	0.000156
4.04	2.47	0.000039
3.64	2.47	0.000002
3.31	2.47	0.000078
3.04	2.47	0.000009
2.81	2.48	0.000039

基片的折射率对测量的灵敏度有明显的影响。图6是典型的硫化锌薄膜的相对测量灵敏度曲线,由图可见,当薄膜满足基片增透膜的折射率条件时(即  $n = \sqrt{n_s}$ ),灵敏度最低。基片的折射率与薄膜折射率相近时,有较高的相对灵敏度。基片本身的  $k$  值很小,它对介面反

表5 锗薄膜  $n, k$  值

Table 5 Values of  $n, k$  of the germanium coating

$d=1.48 \mu\text{m}$ (硅 基底)		
$\lambda(\mu\text{m})$	$n$	$k$
5.60	3.79	0.00008
3.85	3.90	0.00016
2.83	3.63	0.00813

射的影响可以忽略。对于基片的体内吸收所引起的透射率降低,需用两个非相干表面的反射理论予以修正。

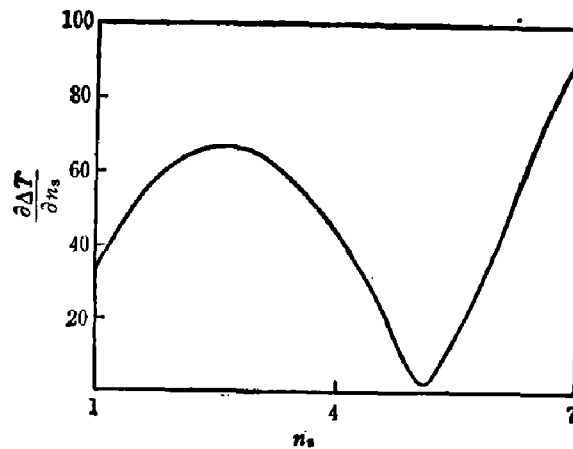


图6 基片折射率对测量硫化锌薄膜折射率灵敏度的影响 ( $n=2.25$ )

Fig. 6 The effect of refractive index of the substrate on measurement sensitivity of refractive index of ZnS film ( $n=2.25$ )

## 五、结束语

用分光光度计测出光谱曲线,然后用微型计算机计算  $n, k, d$ , 是一种测量薄膜光学材料光学参数简单易行的方法,所达到的精度可以满足一般滤光片设计者的要求。

## 参 考 文 献

- [1] Som S.C. and Chowdhory C., *J. Opt. Soc. Amer.*, **62**(1972), 1:10.
- [2] Aspnes D.E. and Studa A.A., *Appl. Opt.*, **14**(1975), 1:220.
- [3] Stabie R.W. et al., *Appl. Opt.*, **14**(1975), 4:999.
- [4] Hunderi O., *Appl. opt.*, **16**(1977), 11:3012.
- [5] Konova A. et al., *Thin Solid Films*, **27**(1975), 83.
- [6] Shamir. J. and Craff., *Appl. Opt.*, **14**(1975), 12:3053.
- [7] Heavens O. S., *Physics of thin films*, **2**(1964), 193.
- [8] Pulfrey D.L. and Reche J.H., *Appl. Opt.*, **12**(1973), 7:1577.

# A SIMPLE METHOD FOR MEASURING $n$ , $k$ , $d$ OF COATINGS

ZHANG FENGSAO, ZHU LINGXIN, WANG SHOUYING

*(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)*

## ABSTRACT

A simple measurement method for optical parameters of coatings is described. According to the relation between maximums or minimums of transmissive interference spectrum and  $n$ ,  $k$ ,  $d$  of coatings, the  $n$ ,  $k$  and  $d$  are easily calculated with a personal computer.