

# 测量薄膜材料 $n$ 、 $\kappa$ 、 $d$ 的简易方法 及其在低温测量中的应用

冯伟亭 严义埏

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

**摘要**——介绍了一种测定薄膜材料光学常数的简易方法, 它的最大优点是只需要知道薄膜材料的透射光谱. 薄膜的光学常数和厚度测试精度优于 1%, 并给出了 PbTe、ZnSe 薄膜在室温及低温下的折射率.

**关键词**——薄膜材料, 光学常数, PbTe, ZnSe.

## 1. 引 言

薄膜材料的折射率  $n$ 、消光系数  $\kappa$  和厚度  $d$  是设计光学滤光片至关重要的参数. 众所周知, 薄膜折射率和消光系数与薄膜沉积过程工艺参数(如基板温度、沉积速率和真空度等)有着密切关系, 同时, 薄膜光学常数又受工作环境温度的影响<sup>[1~6]</sup>.

本文的方法是采用计算机程序调整薄膜光学常数, 以计算所得的薄膜透射率曲线与实测光谱曲线吻合为判据, 从而确定光学薄膜的折射率、厚度和消光系数. 我们采用 Clark<sup>[7]</sup> 给出的  $\alpha$ -Si:H 理论光学常数, 计算沉积在石英基片上、几何厚度为  $1\mu\text{m}$  的  $\alpha$ -Si:H 单层膜光谱透射率, 以该光谱作为本方法中的实测光谱, 用计算程序反推出  $\alpha$ -Si:H 膜光学常数, 其结果验证了本方法的精度. 最后, 我们采用这种方法测量了 PbTe 和 ZnSe 两种材料在  $2\sim 12\mu\text{m}$  光谱范围内从室温至 80K 的折射率.

## 2. 原 理

考虑到光穿过单层薄膜时产生的干涉效应, 薄膜透射率严格表达式为

$$T = 4N_s(1 - R_s)A_s / [ |B + C|^2 (1 - RR_s A_s^2) ], \quad (1)$$

其中

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta & i \sin \delta / N \\ iN \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ n_s - i\kappa_s \end{pmatrix}. \quad (2)$$

式 (1) 和 (2) 中  $\delta = 2\pi N d / \lambda$  为薄膜的相位厚度,  $N = n - i\kappa$  为薄膜的复折射率,  $A_s =$

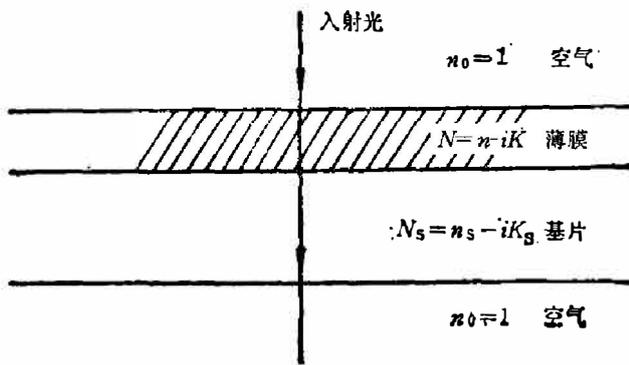
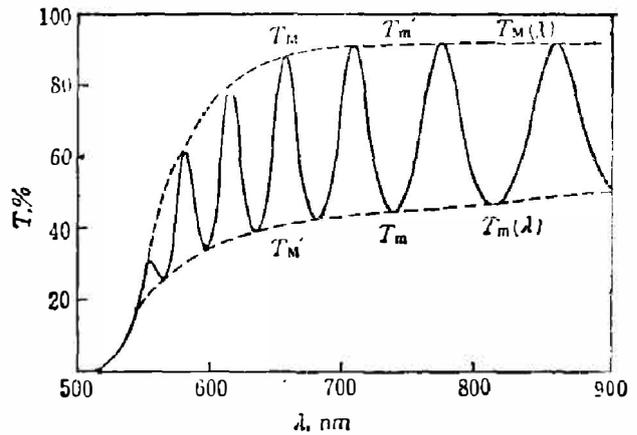


图 1 单层薄膜示意图

Fig. 1 Transmission light beam in a single film.

图 2 镀在石英基片上的厚度为  $1\mu\text{m}$   $\alpha\text{-Si:H}$  薄膜模拟透射光谱Fig. 2 Simulated transmission spectrum for a thin  $\alpha\text{-Si:H}$  film of uniform thickness  $d=1\mu\text{m}$  on a finite quartz substrate.

$\exp(-4\pi\kappa_s d_s/\lambda)$  为基片的吸收率,  $R_s = [(n_s - 1)^2 + \kappa_s^2] / [(n_s + 1)^2 + \kappa_s^2]$  和  $R = [(n - n_s)^2 + (\kappa - \kappa_s)^2] / [(n + n_s)^2 + (\kappa + \kappa_s)^2]$  分别为两基本界面上的反射率。

一般而言, 由于材料吸收和长波透射限之间的透明区的材料色散并不大, 当波长  $\lambda = 4nd = m\lambda$  ( $m$  正整数) 时, 薄膜透射率出现极值, 如图 2 所示。我们假设当膜层厚度变化时, 透射率极大值  $T_M$  和极小值  $T_m$  是波长  $\lambda$  的连续函数  $T_M(\lambda)$ 、 $T_m(\lambda)$ , 那么  $T_M(\lambda)$  和  $T_m(\lambda)$  恰好是透射率曲线的两条包络线。从图 2 可见, 任一极大值  $T_M$  对应下包络线  $T_m(\lambda)$  上同一波长的下一个点  $T'_M$ , 同样, 任一极小值  $T_m$  对应上包络线  $T_M(\lambda)$  上同一波长下一个点  $T'_m$ 。在实际工作中,  $T'_M$  和  $T'_m$  可以通过邻近 3 个极点间的抛物线内插求得。利用实测光谱及相应的两条包络曲线, 原则上只要通过改变  $n$ 、 $K$  使计算所得的透射率逼近实测值, 便能唯一地确定  $n$ 、 $d$ 、 $\kappa$ 。

### 3. 数值模拟

为了验证本方法的精度 我们推荐具有如下典型特性的  $\alpha\text{-Si:H}$  薄膜<sup>[7]</sup>, 透明基片折射率  $n_s = 1.51$ , 膜层折射率  $n = 0.3/\lambda^2 + 2.6$ , 膜层吸收系数  $\lg \alpha = 1.5/\lambda^2 - 8$ , 膜层厚度  $1\mu\text{m}$ 。相应透射率曲线如图 2 所示。从式 (1)、(2) 可以求得相应波长的透射率极大值  $T_M$  和极小值  $T_m$ , 如果我们假设光谱仪测试精度为 0.1%, 得到如表 1 所示的实验数据  $T_M$  和  $T_m$ 。

分析表明, 薄膜光学厚度为  $\lambda/2$  处透射率对薄膜消光系数敏感, 而  $\lambda/4$  处透射率对薄膜折射率敏感。如图 2 所示, 我们调节消光系数  $\kappa$  去逼近  $T_M(\lambda)$ , 调节折射率逼近  $T_m(\lambda)$ , 使得计算所得光谱透射率和实测透射率之差小于一定值, 即可得到薄膜折射率和消光系数。如果我们把文献 [7] 给出的折射率和消光系数作为真实值  $n_{tr}$ ,  $\kappa_{tr}$ , 那么根据  $T_M$ 、 $T_m$  实验数值拟合所得  $n$ 、 $\kappa$ 、 $d$  就是相应的实验值, 比较  $n$ 、 $\kappa$  与  $n_{tr}$ 、 $\kappa_{tr}$  就可以直观地看出本方法的精度。

表1 图2所示光谱极值  $T_M, T_m$  和波长  $\lambda$  对应的  $n, \kappa, d$  值  
 Table 1  $n, \kappa$  and  $d$  corresponding to the values of wavelength,  $T_M$  and  $T_m$  shown in Fig. 2.

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$T_M$	$T_m$	$n$	$n_{tr}$	$m$	$\kappa$	$\kappa_{tr}$	$d$ ( $\mu\text{m}$ )
0.859	0.919	0.480	3.007	3.007	14	0.00007	0.00007	1.000
0.814	0.918	0.470	3.051	3.053	15	0.00012	0.00012	1.000
0.775	0.917	0.459	3.100	3.099	16	0.00015	0.00019	1.000
0.740	0.913	0.448	3.149	3.148	17	0.00035	0.00032	0.998
0.710	0.908	0.438	3.194	3.195	18	0.00054	0.00053	1.000
0.683	0.899	0.426	3.244	3.243	19	0.00089	0.00089	1.000
0.659	0.883	0.414	3.288	3.291	20	0.00143	0.00149	1.002
0.636	0.853	0.398	3.344	3.342	21	0.00261	0.00259	0.998
0.617	0.808	0.381	3.388	3.388	22	0.00429	0.00428	1.001
0.598	0.730	0.355	3.440	3.439	23	0.00742	0.00744	0.999
0.582	0.621	0.321	3.493	3.486	24	0.01238	0.01242	0.999
0.564	0.442	0.261	3.544	3.543	25	0.02328	0.02331	0.994
0.555	0.328	0.215	3.573	3.574	26	0.03273	0.03272	1.009
0.539	0.138	0.113	3.642	3.634	27	0.06353	0.06350	0.993

折射率相对精度可以表示为

$$\Delta n/n \leq f(n, n_s) [T_M \Delta T_m / T_m + T_m \Delta T_M / T_M] / (T_M - T_m),$$

其中  $f(n, n_s) = (n^2 - 1)(n^2 - n_s^2) / [2(n^4 - n_s^4)]$ . 假设  $\Delta T_M / T_M = \Delta T_m / T_m = \Delta T / T$ , 那么  $\Delta n/n \leq \Delta T / T [(T_M + T_m) / (T_M - T_m)] f(n, n_s)$ .

吸收系数相对误差可以表示为

$$\Delta \alpha / \alpha \leq [T_M |q_2 n - \sqrt{T_m / T_M}| \Delta T_m / T_m + T_m |q_2 n - \sqrt{T_M / T_m}| \Delta T_M / T_M] / (T_M - T_m),$$

其中  $q_2 = (n_s + 1)(n^2 + n_s)$ .

## 4. 实验与分析

表2 给定温度下 PbTe 在不同波长的折射率  
 Table 2 Refractive index of PbTe film at various wavelengths under given temperature.

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$n$ (300 K)	$n$ (130 K)	$n$ (80 K)
4.099	5.975		
4.408	5.931		
4.767	5.879		
5.189	5.818	6.301	6.451
5.738	5.789	6.235	6.325
6.433	5.770	6.139	6.232
7.347	5.766	6.059	6.218
8.466	5.695	6.047	6.151
10.167	5.699	5.952	6.004
12.510	5.609	5.845	5.929

#### 4.1 样品制备

所有基片均是直径为 15mm 的锗片, 厚度为 1.5mm, 镀膜时基片温度为 200°C, 沉积速率为 2nm/s, 真空度为  $6.67 \times 10^{-3}$  Pa. PbTe 和 ZnSe 薄膜几何厚度分别为 2.23  $\mu\text{m}$  和 4.825  $\mu\text{m}$ .

#### 4.2 实验数据处理

实验采用 BRURER 红外光谱仪, 光谱范围为 2~12  $\mu\text{m}$ , 调节杜瓦瓶温控, 使薄膜温度分别控制为 300K、130K、80K. 测得的透射率数据经过计算机处理, PbTe 和 ZnSe 的折射率数据和图表分别如表 2、3 和图 3、4 所示.

表 3 给定温度下 ZnSe 在不同波长的折射率  
Table 3 Refractive index of ZnSe film at various wavelengths  
under given temperature.

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$n$ (300 K)	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$n$ (300 K)	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$n$ (80K)
2.058	2.565	2.245	2.563	...	...
2.348	2.560	2.468	2.558	...	...
2.733	2.556	2.885	2.555	2.733	2.549
3.770	2.553	4.110	2.552	4.110	2.546
4.462	2.550	4.913	2.549	4.913	2.544
5.454	2.547	7.009	2.544	5.454	2.543
8.188	2.542	...	...	...	...

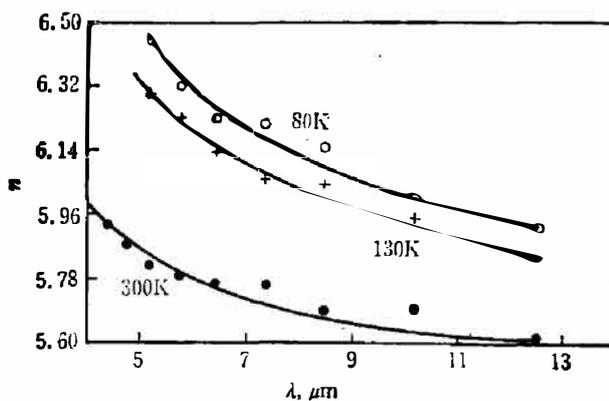


图 3 3种温度下 PbTe 的折射率  
Fig 3 Refractive index of PbTe film at  
three temperatures.

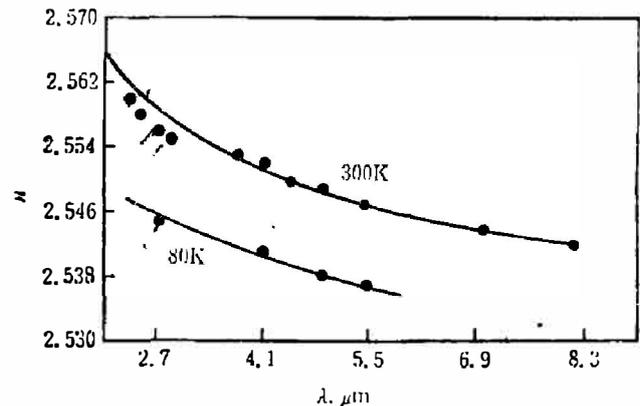


图 4 两种温度下 ZnSe 的折射率  
Fig. 4 Refractive index of ZnSe film at  
two temperatures.

## 5. 结 论

我们算得两种薄膜平均折射率随温度的变化率: 对于 PbTe,  $dn/dT = -3.0 \times 10^{-3} (\text{K}^{-1})$ ; 对于 ZnSe,  $dn/dT = 4.8 \times 10^{-6} (\text{K}^{-1})$ . 可以看出, ZnSe 薄膜折射率随温度变化是很小的, 这对于滤光片的实用是有利的. PbTe 薄膜的光学性质对温度是十分敏感的, 随着温度的变化, PbTe 折射率和吸收限都会发生重大的变化.

本文方法简单易行, 所达到的精度足以满足实用需要.

## 参 考 文 献

- [1] Seeley J. S., Hunneman R. and Whatley A., SPIE Vol. 246, *Contemporary Infrared Sensors and Instruments* (1980) /83.
- [2] Piccioli N., *J. Phys. Chem. Solid*, **35** (1974), 971~977.
- [3] Zemel JAY. N., *Phys. Rev.*, **140** (1965), A330.
- [4] Swanpoel R., *J. Phys. E: Sci Instrum.*, **16** (1983), 1201.
- [5] Heavens O. S., *Physics of thin films*, **2** (1964), 193.
- [6] Pulfrey D. L. and Reche J. H., *Appl. Opt.*, **12** (1973), 7: 1577.
- [7] Clark A. H., 1980 *Polycrystalline and Amorphous Thin Film Devices* (New York: Academic) chap. 4, p. 135~152.

# A SIMPLE METHOD FOR DETERMINATION OF $n$ , $\kappa$ , $d$ . OF COATINGS AND ITS APPLICATION AT LOW TEMPERATURES

FENG WEITING, YAN YIXUN

*(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica, 200083, Shanghai, China)*

## ABSTRACT

A simple method for determination of the optical constants of coatings is described, for which, only the transmission spectrum is requisite. The error of the measured optical constants and the thickness of coatings is less than 1%. Refractive indexes of PbTe and ZnSe coatings are given from ambient temperature to 80K.