

测量薄膜光学参数 d 的工作报告

陈 奋 飞

一、工作原理：

图 1 是仪器的光路图。本仪器分成干涉仪和单色仪两部分。前者包括照明系统，干涉仪主体以及成象系统。后者则由狭缝、物

镜 L_3 ， L_4 ，分光棱镜以及显微镜组成。由 L_1 出来的是平行光，经半透镜反射后垂直投射到干涉仪上，物镜 L_2 把干涉仪成像到单色仪的狭缝上。由显微镜即可看到等色序干涉条纹。

图 2 是干涉仪的工作原理图

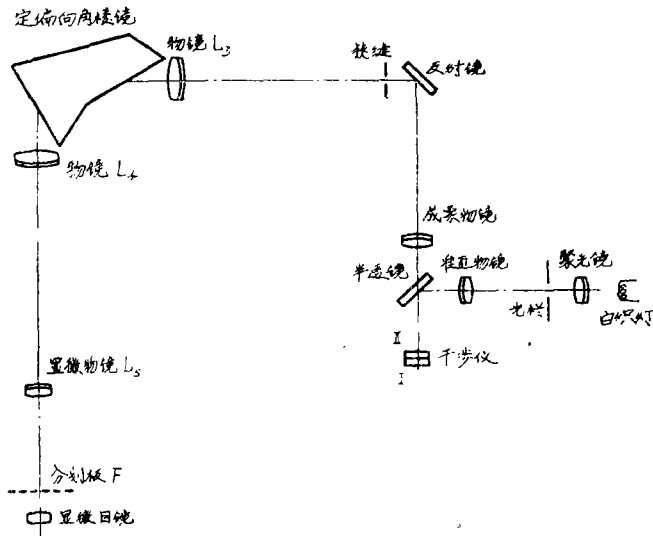


图 1

I 与 II 是 K_2 玻璃平板。在平板 II 的表面上半边度待测膜，形成锐利的台阶，台阶的高度 t 是待测的。然后整个地镀一层全反射银膜，其厚度在 1000 到 2000 \AA 之间，以保证没有光线透过。在平板 I 的光学平面上镀一层透光银膜，其反射率 $R = 90 \sim 95\%$ ，透过率 $T = 3 \sim 5\%$ 。然后把平板 I 和 II 面对面地扣在一起。调整使之互相平行。这就构成反射型法卜里——伯罗干涉仪。

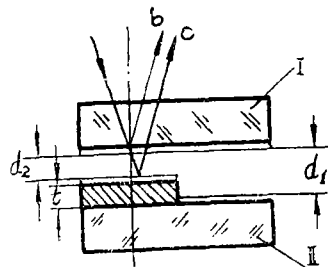


图 2

当光线投射到干涉仪上时（见图 2），大部分光线 b 在平板 I 的镀银表面上反射。一

小部分透过后经平板 II 反射再由平板 I 透过为光线 c 。光线 b 与 c 的光程差等于

$$\Delta = 2nd \cos \varphi \quad (1)$$

式中, d 是空气隙的厚度。 n 是两板间介质的折射率, 在此是空气 $\therefore n = 1$ 。 φ 是折射角, 当垂直入射时 $\varphi = 0$, $\cos \varphi = 1 \therefore$ (1) 式可写成:

$$\Delta = 2d \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{当 } \Delta = 2d = m\lambda_1 &= (m+1)\lambda_2 \\ &= (m+2)\lambda_3 = \dots \dots (3) \end{aligned}$$

则在反射光路中满足上述条件的 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ 所对应的单色光产生相消干涉。即这样的单色光不被反射。

如果采用的光源是具有连续光谱的白光, 那么对应于一定厚度 d 的空气隙总可以找到一系列的 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ 满足(3)式, 于是反射光不再为连续光谱, 但肉眼直接观察不出来。若如图1经过透镜 L_2 把干涉仪放大成像在单色仪的狭缝上, 那么经分光展开后, 在单色仪的后焦面上就会得到: 在连续光谱背景上的一组很细的黑条纹(类似吸收光谱), 它们所对应谱线的波长是分别满足(3)式的 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ (见图3)。通过波长鼓把它们测出来, 然后代入(3)式即可求出空气隙的厚度 d , 它等于

$$\begin{aligned} d &= \frac{1}{2} m \lambda_1 = \frac{1}{2} (m+1) \lambda_2 \\ &= \frac{1}{2} (m+2) \lambda_3 = \dots \dots (4) \end{aligned}$$

其中
$$m = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (5)$$

m 是干涉级次, 取整数

显然, 公式(3), (4), 和(5)是通用公式, 对于有待测膜区与无待测膜区均成立。

对于无待测膜区, 则

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{1}{2} m \lambda_1 = \frac{1}{2} (m+1) \lambda_2 \\ &= \frac{1}{2} (m+2) \lambda_3 = \dots \dots (6) \end{aligned}$$

对于有待膜区

$$\begin{aligned} d_2 &= \frac{1}{2} m' \lambda'_1 = \frac{1}{2} (m'+1) \lambda'_2 \\ &= \frac{1}{2} (m'+2) \lambda'_3 = \dots \dots (7) \end{aligned}$$

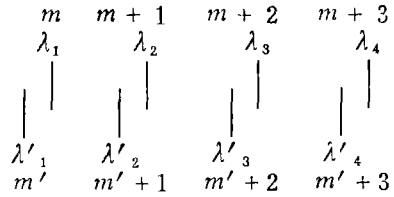


图3

由图2可见, 待测膜厚度 t 等于

$$t = d_1 - d_2 \quad (8)$$

把式(6)与(7)代入(8), 可得:

$$t = \frac{1}{2} (m\lambda_1 - m'\lambda'_1) \quad (9)$$

当 $t < \frac{\lambda}{2}$ 时, $m = m'$, 于是

$$t = \frac{1}{2} m (\lambda_1 - \lambda'_1) \quad (10)$$

二、精度分析:

1. 单色仪精度:

由公式(10)

$$t = \frac{m}{2} (\lambda_1 - \lambda'_1)$$

m 为干涉级次, 取整数。所以

$$\begin{aligned} \Delta t_1 &= \frac{m}{2} \sqrt{\Delta \lambda^2_1 + \Delta \lambda^2_1} \\ &\approx \frac{\sqrt{2}}{2} m \Delta \lambda \quad (11) \end{aligned}$$

由公式(10)和(11)可见:

a) 厚度 t 仅仅是波长 λ 一个变量的函数, 测量误差 Δt 也只取决于波长 λ 的测量精度 $\Delta \lambda$, 因此, 波长 λ 测得越准, 则厚度 t 的测值也就越可靠。这一点正是等色序干涉条纹比菲索条纹更为优越, 精度更高的原因所在。

b) $\Delta \lambda$ 并非直接以一比一影响到 Δt , 而是要乘上一个大于一的系数 $\frac{\sqrt{2}}{2} m$ 。如 $m = 20$, 则 $\Delta \lambda = 2 \text{ \AA}$ 时, Δt 就等于 14 \AA 。因此希望 m 取尽可能小的值。

2. 平行光束与干涉仪不垂直 ($\varphi \neq 0$) 的影响。

在推导公式(9)和(10)时,认为程差公式(1)中的角度 $\varphi = 0$,即假定光束是垂直投射到干涉仪上。实际上这是很难做到的。因此由于 $\varphi \neq 0$,就要引进误差 Δt_2 。

当 $\varphi \neq 0$ 时,公式(10)应写成:

$$t + \Delta t_2 = \frac{m}{2 \cos \varphi} (\lambda_1 - \lambda'_1) \quad (12)$$

(12)-(10)得

$$\Delta t_2 = \frac{1 - \cos \varphi}{\cos \varphi} \cdot t \quad (13)$$

本仪器采用的平行光管物镜 L_1 的焦距 $f = 50\text{mm}$,若自准可达到的精度是 0.2mm ,则 $\varphi = \frac{1}{2} \cdot \frac{0.2}{50} \approx 7'$,而 $\frac{1 - \cos \varphi}{\cos \varphi} \approx 0.000002$ 所以 $\Delta t_2 = 0.000002 t$ 。

即所引起的误差 Δt_2 只不过是 measurable 厚度的百万分之二,非常小。

我们做了实验,所得数据证明,第二次测量相对于第一次测量倾斜 $24'$ 时,测量结果的差值在测量精度范围内。因此,这项因素在目前我们的测量精度不是要求特高的情况下,可以不考虑。

3. 位相色散的影响

在公式(9)和(10)的推导过程中,没有考虑光从界面反射时的位相改变 $\varphi(\lambda)$,认为 $\varphi(\lambda) = 0$ 而实际上 $\varphi(\lambda)$ 不仅不等于零,而且还是波长 λ 的函数。因此精确的公式应该是:

$$t = \frac{1}{2} (m\lambda_1 - m'\lambda'_1) + \frac{1}{2} [\varphi(\lambda_1) - \varphi(\lambda'_1)] \quad (9')$$

$$\text{或 } t = \frac{1}{2} m (\lambda_1 - \lambda'_1) + \frac{1}{2} [\varphi(\lambda_1) - \varphi(\lambda'_1)] \quad (10')$$

可见利用公式(9)或(10)求出的膜厚 t 不可能是高精度的,而存在下列系统误差 Δt_3

$$\Delta t_3 = \frac{1}{2} [\varphi(\lambda_1) - \varphi(\lambda'_1)] \quad (14)$$

如果已知位相色散 $\varphi(\lambda)$,或通过实验求出 $\varphi(\lambda)$ 曲线,那么对这项误差可以进行

修正。但由于 $\varphi(\lambda)$ 不仅取决于反射膜材料的性质,而且与蒸涂的条件,膜层的厚度等因素有关,因此对每一种试片就要测一次 $\varphi(\lambda)$ 曲线,这不仅是很麻烦的,而且几乎是不可能的。

根据文献介绍,如果反射膜和半透膜是采用高速蒸发高纯度的新鲜银膜,由于其位相色散曲线 $\varphi(\lambda)$ 几乎与 λ 轴平行,那么可以采用近似公式(9)或(10)而不致引起太大的误差。

综上所述,关键的问题是第一项,即准确地测量波长 λ 值,而这完全取决于单色仪的精度。

目前我们采用的是现成的万能单色仪,虽然做了一些改进,但由于谱线标定不够密,所测波长的准确度只能达到 $1 \sim 2 \text{ \AA}$ 的数量级。按上述分析,用我们的仪器测量膜层厚度所能达到的精度是 $\pm 30 \text{ \AA}$ 。

三 实 验

A. 干涉仪的调整装置(见图4)

干涉仪两玻璃平板1和2分别通过垫片3,顶丝4固定在四爪架5和6上。微调螺母7可使两平板互相平行。整个夹具通过圆筒8固定到可升降俯仰,旋转的支座上。

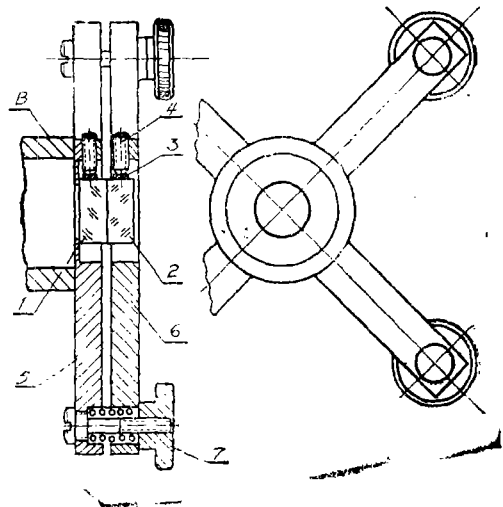


图 4

这套装置调整方便迅速。装平板 2 时，稍微压一压使与平板 1 贴紧。这时在单色仪上即可看到条纹，再稍微调一调螺母 7，即可达到要求。

B. 一次装调的测量结果

干涉仪平板 I 和 II 是采用 K₂ 玻璃，其

面型是四分之一波长，光洁度是 III。利用专制的夹具在平板 I 的光滑表面上半镀以被测膜，然后整个地镀上一层厚度大于 1000 Å 的银膜，平板 II 的一个表面镀以透过率为 3~5% 的银膜。之后把平板 1 和 2 装到仪器上进行测量，得出结果如下

表 1

	1	2	3	4	5	1'	2'	3'	4'	5'
S°	3801	3284	2700	2041	1301	3687	3192	3642	2019	1324
λ _i (Å)	6381	5805	5324.5	4915	4566	6238.5	5718	5283	4903	4576
Δλ _i		579	480.5	409.5	348.5		520.5	435	380	327
m _i	10.078	11.081	12.00	13.10		10.985	12.145	12.90	13.994	
m _i	10	11	12	13	14	11	12	13	14	15
m, λ _i	63810	63855	63894	63895	63931	68623	68616	68679	68642	68640

$$\Sigma m_i \lambda_i = 319385$$

$$(m_i \lambda_i)_{\text{平均}} = 63877$$

$$\Sigma m'_i \lambda'_i = 345200.5$$

$$(m'_i \lambda'_i)_{\text{平均}} = 68640$$

$$\text{厚度 } t = \frac{68640 - 63877}{2} = \frac{4763}{2} = 2381.5 \text{ \AA}$$

对于 λ = 6381 Å 这根谱线，多次重复瞄准的均方误差 B = 1.0 Å，而 λ = 5324 Å 的 B = 0.45 Å，波长越短则 B 就越小。取 B = 0.8 Å，则 3B = 2.4 Å

取 m = 12，则 Δt = 20.36 Å（极限误差）∴ 一次装调测出的结果是：

$$t = 2381 \pm 20 \text{ \AA}$$

C. 多次装调测出结果的比较：

把试片从仪器上拿下来，再装上测量。如此重复几次，可得到一系列 t_i 值，列成下表：

表 2

	t _i	t _{平均}	v _i	v _i ²
1	2378.7	2370.88	+ 7.82	60.15
2	2358.1		- 12.78	163.33
3	2381.5		+ 10.62	112.78
4	2358.5		- 12.38	153.26
5	2368.87		- 2.01	4
6	2357.0		- 13.88	192.65
7	2385.07		+ 14.19	201.36
8	2379.30		+ 8.42	70.9

$$\sum v_i^2 = 958.43$$

$$B_i = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{958.43}{8-1}}$$

$$\approx \pm 11.7 \text{ \AA}$$

由表 1 和表 2 的数据, 可以看出: 对于一次装调的测量来说, 只不过是利用了单色仪全波段中的某几根特定谱线, 尽管对每一根谱线的瞄准精度很好, 但得到的波长 λ_i 值却始终存在一固定的误差 $\delta\lambda$, 因此计算出来的 t_i 值也始终存在误差, 但在一次装调的测量数据中却反应不出来。多次装调意味着采用不同的干涉级次, 而且对应的谱线也各不相同, 它们所对应的波长差 $\delta\lambda_i$ 不仅在数值上而且在符号上也不相同, 因此计算出来的 t_i 值存在差别, 如表 2 所示, 由于单色仪的波长差反应到测量结果中来是带有偶然性, 因此可以按偶然误差的规律来处理。所以一次装调测量结果的不确定度为 $3B_i = 35 \text{ \AA}$ 。与理论分析基本一致。

四 结 束 语

为验证上述分析与实验, 我们曾利用日本的 Angstrometer 对同一试片进行测量,

得到的结果是 $t = 2346.6$ 。这台仪器是采用菲索条纹原理。仪器说明书没有给出精度指标, 而且仪器上没有测微机构, 条纹间距 l 和台阶高度 Δl 是根据分划板上的尺目测估计的。因此不确定度是要大些。但由所得结果也足以说明我们仪器的测量结果在 $\pm 30 \text{ \AA}$ 的精度范围内是可以信得过的。

我们的工作虽然取得了一定的进展, 但还存在不少问题。首先, 仪器不是一个整体, 单色仪和干涉仪是分开的, 因此操作要特别仔细, 否则条纹抖动, 不易瞄准。其次, 干涉仪的调整机构不理想。虽然调整方便迅速, 但调好后, 条纹漂移, 要经历相当长的时间才能稳定下来。最后, 单色仪的波长——波长鼓曲线标定不够细, 点数太少, 影响准确度。因此还需要做进一步的努力。

参 考 文 献

1. «Physics of Thin Film» vol. 4 (1967)
2. «薄膜光性的测定» 李懋廉 长春光机所