

## 新的 光 干 涉 实 验

### ——多光束等厚干涉测薄膜厚度

邱榴贞 杨之昌 章志鸣

(复旦大学物理系)

多光束等厚干涉条纹具有干涉条纹锐细的优点,可以大大提高干涉法计量的精确度.目前已经有以下几方面的应用:1.测量厚度在 $1\mu\text{m}$ 以下的薄膜厚度;2.检查高级光学平面的质量,研究接近平面的晶体表面和金属表面的形状和特性<sup>[1]</sup>;3.测量液体的折射率<sup>[2]</sup>;4.测量 $\mu\text{m}$ 以下的细丝的直径和光学特性(例如人造纤维的直径和折射率).也已生产了基于本原理的商品仪器.

根据科学技术的发展,我们设计了一个实验——用多光束等厚干涉测定薄膜厚度,作为本科二年级学生物理光学实验.希望学生通过本实验对光学中出现其它形式的多光束等厚干涉现象有较深刻的理解<sup>[3]</sup>.

### 一、实验原理

1.用一束单色光入射到由两块光学平面组成的空气楔上,分别经两个光学平面的反射光束进行干涉,即可在空气楔附近形成等厚干涉条纹.由双光束干涉所形成的图样,其光强度是 $(\cos^2 \delta)/2$ 的函数,其中 $\delta$ 是这两光束之间的光程差.由于它的明暗条纹较粗,使用干涉法测量的精度受到限制.

若我们分别在两块光学平面上镀一层铝膜,再合成一个楔角很小的空气楔,然后用一组单色平行光正入射到空气楔上,光束经膜层多次反射并透射出来,我们就可以在空气楔附近观察到多光束等厚干涉条纹,其光强分布的函

数可由下式决定<sup>[4]</sup>:

$$I = C \frac{\sin^2(N\delta/2)}{\sin^2(\delta/2)}, \quad (1)$$

其中 $\delta$ 是相邻两束光的光程差, $N$ 是形成等厚干涉图样的光束数目(一般在十几束到几十束之间), $C$ 是一个常数.

由(1)式可知,多光束等厚干涉条纹比双光束等厚干涉条纹锐细得多.其强度分布情况见图1.

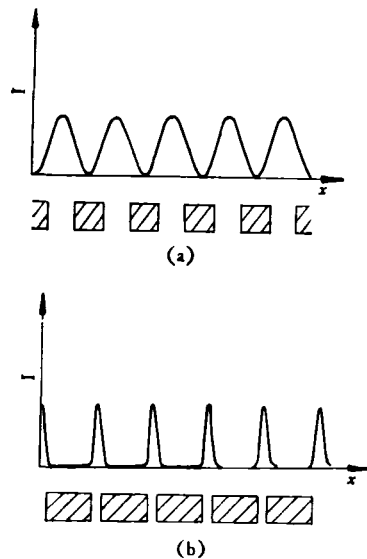


图 1

(a) 双光束干涉条纹; (b) 多光束等厚干涉条纹

2.用干涉法测量薄膜厚度(或长度的微小改变量)的主要原理是,薄膜厚度的改变将引起干涉条纹的移动.在空气楔的情况下,干涉条

纹每移动一间距,薄膜厚度就改变  $\lambda/2$  的大小,故测量薄膜厚度的关键在于测准条纹的移动量. 由于多光束干涉条纹比双光束干涉条纹锐细得多,故可使测量的精度提高一个数量级.

在教学实验过程中,为了便于学生理解和操作,选用的空气楔上有一台阶,其形状如图 2(a) 所示. 图 2(b) 中  $a$  是相邻二锐细的亮条纹之间的间距,  $b$  是由于台阶存在引起的条纹移动量的余数部分,移动量的整数部分用  $k$  表示.

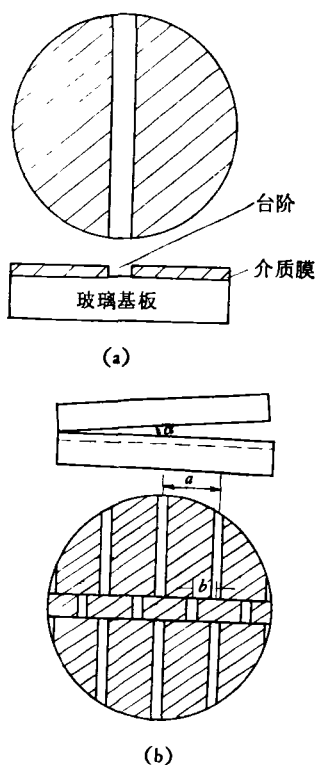


图 2

- (a) 有台阶的反射面;  
(b) 干涉条纹在台阶处的移动量

下面介绍台阶的高度  $h$  和条纹移动量的整数部分  $k$  的确定方法.

我们用读数显微镜测量  $a, b$  的大小,那么台阶的高度  $h$  由下式决定:

$$h = \frac{b}{a} \frac{\lambda}{2} + k \frac{\lambda}{2}, \quad (2)$$

其中  $\lambda$  是单色光的波长.

因为 (2) 式中有  $h$  和  $k$  两个未知数,所以

必须采用两种以上的单色光来做实验. 我们采用汞灯的绿光 ( $\lambda_1 = 5461 \text{ \AA}$ ) 与钠灯的黄光 ( $\lambda_2 = 5893 \text{ \AA}$ ). 这样,对  $\lambda_1$  来说,可以测出  $a_1 b_1$ , 设条纹移动量的整数部分是  $k_1$ ; 对  $\lambda_2$  来说,可以测出  $a_2 b_2$ , 设条纹移动量的整数部分是  $k_2$ . 代入 (2) 式得

$$\begin{aligned} h &= \frac{b_1}{a_1} \frac{\lambda_1}{2} + k_1 \frac{\lambda_1}{2}, \\ h &= \frac{b_2}{a_2} \frac{\lambda_2}{2} + k_2 \frac{\lambda_2}{2}. \end{aligned} \quad (3)$$

利用“符合法”即可同时求出  $h, k_1$  和  $k_2$  (详见第三节). 实验得到的台阶高度  $h$  也就是待测薄膜的厚度.

下面对多光束等厚干涉条纹的其它应用作一简单介绍.

#### (1) 检查高级光学平面的质量

将一待测平面和另一光学平面各镀上一层银反射膜,再紧贴在一起形成空气楔. 用单色平行光正入射到空气楔上,就可以形成多光束等厚干涉条纹. 根据干涉条纹的直线性可判断待测平面的质量. 用这样的方法也可以研究近于平面的晶体表面和金属表面的特性.

#### (2) 测液体的折射率 $n$

取两块镀有反射膜的光学平面,在其中的一块上滴一、两滴待测液体. 然后将另一块光学平面合在上面形成一个有液膜的空气楔. 用单色平行光正入射在空气楔上,就可以在空气楔附近出现如图 3 所示的等厚干涉条纹. 用读数显微镜分别测出在空气处的条纹间距  $a$  及液膜处的条纹间距  $a'$ , 则液体的折射率  $n = a/a'$ . 为了减少测量误差,可以测十根或几十根条纹

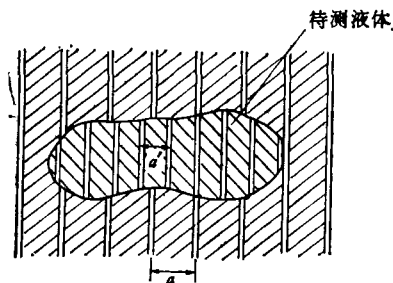


图 3

的间距。

### (3) 测量细丝的折射率

待测的细丝可以是人造纤维或丝状的光学材料,但它们的直径或厚度一定要已知。在测量时只要把细丝垂直于棱放入楔中,楔内充满着已知折射率的液体,而细丝在这种液体中成为光学透明,这种液体称为折射率匹配液。当单色平行光正入射在楔上,就可产生如图4所示的锐细的干涉条纹。用读数显微镜测出匹配液处的条纹间距  $a$  及在细丝处的条纹移动量  $b$ ,

$$a:b = \frac{\lambda}{2n} : \left( \frac{n' - n}{n} \right) d,$$

$$n' = n + \frac{b\lambda}{2ad}, \quad (4)$$

式中  $n$  是匹配液的折射率,  $n'$  是细丝的折射率,  $d$  是细丝的直径。

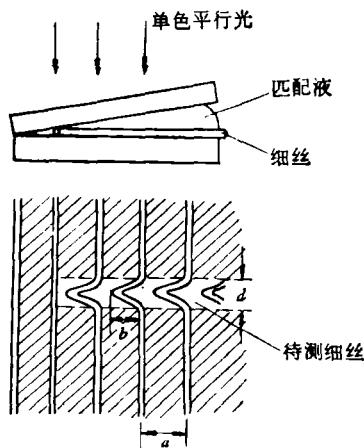


图4

测量细丝直径的方法可参考一般的光学实验书,这里不作赘述。

## 二、实验装置

实验装置如图5所示。多光束等厚干涉条纹采用透射方式进行观察。小孔光阑和会聚透镜的作用是将光源用自准直法转换成平行光。

台阶的制备方法如下:在一块玻璃基板的平面光学平面上,贴上1—2 mm宽度的经过清洁处理的玻璃胶纸,用真空镀膜机涂上一层0.5—

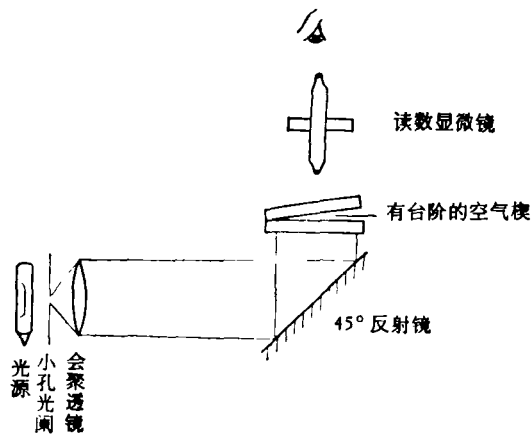


图5 实验装置

1  $\mu\text{m}$  的介质膜,然后把玻璃胶纸撕下,再和已经清洁处理后的平面玻璃基板一起放进真空镀膜机上镀上一层铝膜(反射率在70%以上),将两者合成楔角很小的空气楔即成。

## 三、利用多光束等厚干涉测量薄膜厚度的结果和处理举例

### 1. 测量结果

测量结果见表1。表中

$$\begin{aligned} S_a &= \sqrt{\frac{\sum (a_i - \bar{a})^2}{N(N-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{\sum (\Delta a_i)^2}{90}}, \\ S_b &= \sqrt{\frac{\sum (\Delta b_i)^2}{90}}. \end{aligned}$$

根据间接测量的标准误差传递公式

$$S_h = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{b^2}{a^4} S_a^2 + \frac{1}{a^2} S_b^2}, \quad (5)$$

可求得两个波长的标准误差  $S_{h_1}, S_{h_2}$  均是  $2 \times 10 \text{ \AA}$ 。

### 2. 用符合法求 $h, k_1, k_2$

若用(3)式两个方程解三个未知数是有困难的,但是其中  $k_1, k_2$  是整数,而且薄膜厚度大约在  $1 \mu\text{m}$  左右,那么我们以  $k_1, k_2$  分别为 0, 1, 2, 3, 4, 5... 代入(3)式,可以分别计算出  $h$  值。若  $h$  值相同时,则  $k_1, k_2, h$  同时求得。这个方法在光学计量中就称符合法。计算结果见表2。从表2及误差分析得出该薄膜厚度即台阶的高度  $h = 0.676$  或  $0.674 \mu\text{m}$ , 而  $k_1, k_2$  均是 2。

表 1

序 数	名称 测量值	$\lambda_1 = 5461 \text{ \AA}$				$\lambda_2 = 5893 \text{ \AA}$			
		$a_1$ (mm)	$\Delta a_1$ (mm)	$b_1$ (mm)	$\Delta b_1$ (mm)	$a_2$ (mm)	$\Delta a_2$ (mm)	$b_2$ (mm)	$\Delta b_2$ (mm)
1		0.400	0.007	0.184	-0.004	0.450	0.017	0.138	0.014
2		0.386	-0.007	0.180	-0.008	0.432	-0.001	0.124	0.000
3		0.402	0.009	0.190	0.002	0.436	0.003	0.134	0.010
4		0.390	-0.003	0.180	-0.008	0.436	0.003	0.122	-0.002
5		0.393	-0.003	0.193	0.002	0.428	-0.005	0.122	-0.002
6		0.393	-0.003	0.192	0.004	0.438	0.005	0.122	-0.002
7		0.390	-0.003	0.198	0.010	0.432	-0.001	0.122	-0.002
8		0.398	0.005	0.193	0.002	0.433	-0.003	0.116	-0.008
9		0.392	-0.001	0.192	0.004	0.430	-0.003	0.120	-0.004
10		0.392	-0.001	0.184	-0.004	0.418	-0.015	0.124	0.000
平均值		$\bar{a}_1$ (mm) 0.393	$S_{a_1}$ (mm) 0.002	$\bar{b}_1$ (mm) 0.188	$S_{b_1}$ (mm) 0.002	$\bar{a}_2$ (mm) 0.433	$S_{a_2}$ (mm) 0.003	$\bar{b}_2$ (mm) 0.124	$S_{b_2}$ (mm) 0.003

表 2 单位 ( $\mu\text{m}$ )

$h$ 的计算值 $k_1, k_2$ $\lambda$	0	1	2	3	4	5	...
5461 $\text{\AA}$	0.133	0.493	0.676	0.949	1.222	1.495	...
5893 $\text{\AA}$	0.084	0.379	0.674	0.968	1.263	1.558	...

## 四、讨 论

### 1. 注意事项

(1) 反射膜的反射率能影响干涉条纹的锐细程度,故要选择适当。我们的实验说明,反射率最好能达到80—90%左右。检验反射率是否恰当,可用低压汞灯作照明光源,看它在空气楔附近形成的黄双线的干涉条纹是否分开,若能分开,表明反射率恰当。

(2) 有台阶的空气楔必须有保护装置,我们是将它放在可调节的夹具中。这样可避免学生在做实验时碰坏,影响反射率。

(3) 在测量  $b$  的大小时,要注意条纹移动的方向。实验时可以有意识地在两光学表面间夹一纸片,如图 6 所示。这样比较容易确定条纹是向哪一方向移动。但应注意,用读数显微镜观察到的情况正好与干涉条纹的移动方向相反,因为从显微镜系统观察到的是倒立的虚像。

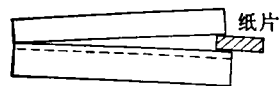


图 6

(4) 为了得到明亮而锐细的干涉条纹,必须有较好的单色平行光照明,所以实验时必须

按图 5 对好光路。

### 2. 测量精度分析

上面举的例子精度是在 1% 以下。在一般的实验中能达到 1—2% 就行了。为提高测量的精度，可以选择两个波长之间的差值大一些的波长(例如采用汞谱线中  $\lambda_1 = 5461 \text{ \AA}$ ,  $\lambda_2 = 4358 \text{ \AA}$ ) 来做实验,也可采用两个以上的波长。

### 3. 主要误差来源

- (1) 由于膜层不均匀引起的误差;
- (2) 由于基板平整度和平行度不好引起的

误差;

- (3) 读数显微镜的读数误差(注意读数显微镜的螺距误差一定要消除)。

### 参 考 文 献

[1] M·玻恩, E·沃耳夫, 光学原理(上册), 科学出版社, (1978), 458—470.  
 [2] G. R. Davies, *Amer. J. Phys.*, **44**-12 (1976), 1215.  
 [3] L. J. Gaghardi, *Amer. J. Phys.*, **42**-4 (1974), 334.  
 [4] 母国光, 光学, 人民教育出版社, (1978), 219—227.

## 硅光电探测器响应时间的测试

邓生贵 杨培生 (中国科学院半导体研究所)

在硅光电探测器的应用过程中, 响应时间是探测器的主要参数之一, 因而对响应时间的测量就很有必要。

### 一、测量原理和方法

当给光电探测器以一个理想的矩形光脉冲辐照时, 如图 1(a) 所示, 由于探测器响应的延

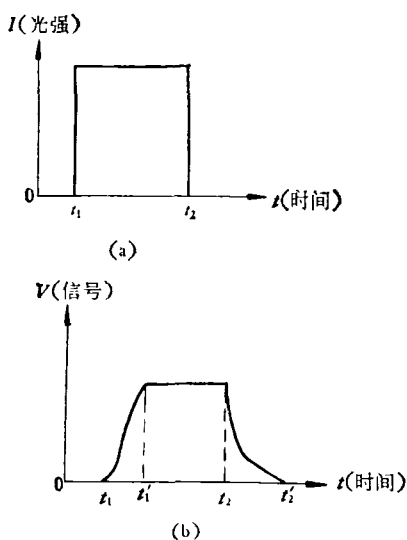


图 1 发射与接收光脉冲波形

迟, 其输出波形就不再是一个理想的矩形脉冲, 而是具有一定的上升前沿和下降后沿的波形, 如图 1(b) 所示。“响应时间”定义为“上升时间”和“下降时间”。

当瞬时地加上稳态光照时, 探测器上的输出电信号从幅值的 10% 上升到 90% 所需要的时间称为探测器的“上升时间”; 或者与此相反, 当瞬时地除去稳态光照时, 探测器的输出电信号从幅值的 90% 下降到 10% 所需要的时间称为“下降时间”。

我们研究了三种具有内部增益的硅光电雪崩二极管(常用符号 APD 表示), 需要测出毫微秒 (ns) 数量级的响应时间。显然, 首先必须要求入射到探测器上的矩形光脉冲的上升时间和下降时间都小于 1ns, 而不必追求理想的矩形光脉冲。采用下列实验装置(图 2), 可以获得

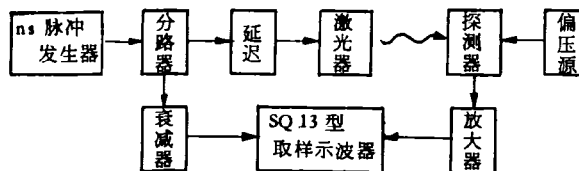


图 2 响应时间测试装置方框图