# 98．如何认识薄膜干涉中的几个问题？

在学习薄膜干涉时学生可能对下面三个问题感兴趣：一是干涉条纹在什么位置（定域问题），二是有关等厚条纹问题，三是有关等倾条纹问题。

对于薄膜干涉，中学物理教学讲得不多，但学生可能会提出一些较为深入的问题。

## 一、薄膜干涉中条纹出现在什么地方？

在中学物理教科书上安排了如下的实验：如图 1 所示，在酒精灯的灯芯上撒一些食盐，让灯焰发出明亮的黄光。做一个铁丝圈，在肥皂水中蘸一下，让它挂上一层薄薄的肥皂液膜。用它观察灯焰的像，会看到灯焰的像中出现近似沿水平方向的明暗相间的条纹，这是薄膜干涉造成的。

图 1 用肥皂膜观察灯焰的像及干涉条纹

会有学生提出这样的问题：薄膜干涉出现的条纹与灯焰的像二者间是什么关系？

灯焰的像是平面镜反射造成的，薄膜的前表面就是一个平面镜，经它的反射成一个等大正立的虚像。但薄膜的后表面反射回来的部分光再次从前表面折射出来，与第一次从前表面反射回来的光线发生相干叠加，使得在灯焰的像范围内光的强度分布发生改变，形成干涉条纹。

经平面镜反射而成的虚像的位置是确定的，眼睛在不同的方值观察，进入眼睛的光线可能是光源上不同的发光点发出的，但每一点发出的光线经反射后都是发散的，并且它们的反向延长线都会聚到与发光点关于镜面对称的位置上。

薄膜干涉是膜的前后表面反射回来的光线叠加造成的，如图 2 所示，在点光源 S 发出的光线中示意性地画出了五条，分别标注为 1、2、3、4、5，从液膜前表面反射的分别是 1ʹ、2ʹ、3ʹ、4ʹ、5ʹ，经后表面反射再折射出来的分别是 1ʺ、2ʺ、3ʺ、4ʺ、5ʺ。由于都是同一个点光源发出来的光线，从空间相干性上讲，它们都是相干光线，又因为液膜的厚度很小，也满足时间相干性的条件，因此所有这些光线都是相干的。这些相干光线的交点情况各不相同，例如图 2 中的光线 4ʹ 和 3ʺ 相交于液膜前表面的 A 点，光线 2ʹ 和 1ʺ 相交于液膜上方空间的 B 点，光线 5ʹ 和 4ʺ 是平行线，可认为相交于无穷远处的 C 点，而光线 2ʹ 和 2ʺ 是发散的，它们的反向延长线相交于液膜下方空间的 D 点，等等。不难看出，只要从点光源 S 射出的光束足够宽，从液膜表面直到无穷远的广阔空间内都有相干光线的叠加，因此可以说干涉条纹是分布在广阔空间里的。如果我们使用透镜成像法观察图 2 中液膜所成的干涉条纹，只要适当调节屏幕与透镜的位置，就可以在屏幕上接收到不同位置上的干涉条纹，图 3 是使用透镜成像法分别观察图 2 中 A、B、C、D 各点的干涉条纹的示意图。

图 2 薄膜干涉中相干光线的交点

1

2

3

4

5

B

A

1ʹ

2ʹ

3ʹ

4ʹ

5ʹ

1ʺ

2ʺ

3ʺ

4ʺ

5ʺ

C

S

D

图 3 用透镜成像法在屏幕上观察液膜上不同位置处的干涉条纹

（a）

（b）

（c）

（d）

S

A

Aʹ

S

B

Bʹ

S

Cʹ

S

D

Dʹ

我们的眼睛相当于一架可变焦距的照相机，它会自动搜索成像的目标而后聚焦于该平面，但我们并不习惯于聚焦在空无一物的空间内的某一平面上，因此当我们用眼睛从火焰一侧直接观察如图 1 所示的实验时，眼睛自动聚焦于灯焰的虚像的平面处，这样就既看到了灯焰的虚像，也同时看到了位于这个平面上的干涉条纹。可以说，我们看到的是液膜后面的“虚”干涉条纹。而其他位置上的干涉条纹则不能在视网膜上成像，因此看不到。

## 二、薄膜干涉中的等厚条纹

薄膜上厚度相等的点的轨迹称为“等厚线”，如果干涉条纹沿着等厚线分布，即同一条明线或暗线对应的位置膜的厚度相等，则称为等厚条纹。由于等厚条纹可以将薄膜厚度的分布情况直观地表现出来，因此它是研究薄膜性质的一种重要手段。光的等厚干涉条纹可以把光波波长 *λ* 的数量级以下的微小长度差别和变化反映出来，可见光波长数量级平均为 5×10−7 m，而精密光学器件精密度要求达到 10−8 m 数量级，光的干涉条纹为我们提供了一种重要的检验光学器件表面精密度的方法。

严格地观察等厚条纹要求入射光与出射光处处与膜表面垂直，如图 4 所示，从小孔 D 射入的光可以看作是由点光源发出的，经过凸透镜 L1 成为平行光，M 是一块半透半反镜，其反射光垂直射到薄膜表面，从膜前表面直接反射和从后表面反射回来的相干光线透过 M 后射向凸透镜 L2，再进入眼球，膜表面上 P1、P2、P3，……相遇的一对相干光在视网膜上 P1ʹ、P2ʹ、P3ʹ，……重新相遇，人就观察到膜表面上的等厚干涉条纹了。如果要做定量测量，可用测距显微镜代替图中的 L2。

P1ʹ

P2ʹ

P3ʹ

L1

L2

眼睛

M

D

图 4 精密观测液膜等厚干涉条纹的装置

P1

P2

P3

由于入射到膜前表面的光线是垂直入射的，因此射入液膜中的光线也是垂直液膜表面的，又由于液膜后表面的倾角很小，可近似认为从后表面返回的光线与射来的光线重合，设膜的厚度为 *h*，液体折射率为 *n*，则光线在液膜中一来一回经历的光程为 Δ*L* = 2*nh*，干涉强度的极大（亮纹）和极小（暗纹）分别位于以下地方：

 或

式中 *λ* 为入射光在真空中的波长。这样，同一条亮纹或暗纹（*k* 值相等），对应的膜的厚度 *h* 相等，相邻两条亮纹或相邻两条暗纹之间对应的厚度差为

Δ*h* =

即半个介质内的波长 *λ*/*n*。这是真正的等厚条纹。

但我们实际观察时常常没有如此严格，例如使用普通光源照射时，既不使用凸透镜，也不使用半反半透镜，直接用眼睛观察，如图 5 所示，当我们用眼睛注视薄膜的表面时，膜的厚度 *h* 和光线的倾角 *i* 都在逐点变化，前后表面反射的两条光线的光程差

Δ*L* ≈ 2*nh*·cos*i*

干涉条纹是等亮度点的轨迹，即同一条干涉条纹的光程差 Δ*L* 是常数，而光程差 Δ*L* 与厚度 *h* 和光线的倾角 *i* 都有关系，它们相互影响。说通俗点，由于倾角变化而引起的光程差变化必须由厚度的变化来补偿。这样，同一条条纹对应的厚度就产生了偏差，因此如图 5 所示的情况只能应用在精度要求不太严格的情况，但在膜的厚度很小的情况下，产生的偏差不是很大时，仍可近似认为是等厚条纹。

光源

眼镜

图 5 不精密观测液膜的等厚干涉条纹

等厚干涉条纹的应用很广，举例如下：

### （1）检测零件表面的光洁度

如图 6 所示为检验精密加工工件表面光洁度的装置，使用的器材就是一块作为标准平面的玻璃板，先把待检验的工件平放在钠黄光灯下，再把标准平板玻璃放在它的上面，用手指轻轻压标准平板的一边，则标准平板与工件间形成一个很薄的楔形空气膜，人在上面观察干涉条纹。如果出现的是等间距的平行条纹，则说明工件的光洁度已经达到要求，如果条纹发生弯曲或畸变，则说明未达到要求，仍需维续研磨。

干涉条纹

标准平面

工件

图 6 检验工件的表面光洁度

### （2）检测光学器件表面的曲率

如图 7 所示为检验透镜曲率的装置，使用的器材是一块标准模具，它的上表面的曲率是标准的，把待检验的透镜放在它的上面，在钠黄光的照射下，从上方可以看到透镜下表面与标准模具上表面间形成的气隙产生的干涉条纹，如果干涉条纹是环形的，则说明二者的曲率比较接近了，环形条纹的圈数越少，二者就越接近，当条纹只有一圈时，说明二者的最大差距为 *λ*/2。至于应继续研磨透镜的中央还是边缘，只要用手指轻轻压一下透镜的中央，看环形的条纹是向外扩大还是向里收缩即可判断出来。

干涉条纹

待检测透镜

标准模具

图 7 检验透镜曲率

### （3）精密测量

图 8 是精密测量细丝直径和滚珠直径的装置。很细的细丝，例如玻璃纤维丝，很难用传统的方法精确测量其直径，把它夹在两块平面玻璃板之间的边缘处，用单色平行光束从上方照射，可以看到中间空气隙产生的等厚干涉条纹，数出条纹的总数为 *n*，只要知道入射光的波长 *λ* 的数值，就可计算出细丝的直径 *D* = *n*·，这种方法的精确度远高于采用其他方法所得的结果。精确测量滚珠的直径，需要使用一块高度与滚珠直径相近的标准块规，把它们一起夹在两块标准平面玻璃板之间，同样通过干涉条纹计算出上面玻璃板与标准块规间空气隙的夹角 *α*，进一步通过几何关系精确地得出滚珠的直径。

空气隙

图 8 精确测量细丝和滚珠的直径

标准

块规

空气隙

细丝

### （4）测薄膜的厚度

表面敷膜技术的应用已经很广泛。例如，在光学器件的表面敷上增透膜或增反膜，在眼镜的表面镀膜，等等。敷上去的透明膜很薄并且厚度均匀，但怎样精密地测量这么薄的薄膜的厚度呢？人们发现，使用复色光照射敷盖在表面的透明薄膜，会呈现出不同的颜色，这是因为不同的色光波长不同，它们各自在薄膜表面形成一套干涉图样，当薄膜的厚度满足一定条件时，某种光波的强度在膜的表面处达到极大，而其他颜色的光波的强度在膜的表面处达不到极大，甚至是极小，于是其他颜色就被掩盖了，而呈现出某种颜色，这就为我们找到了一种精确测量膜的厚度的方法，具体做法是：预先制备一系列敷盖着不同厚度的透明膜的样板，这些样板的膜的厚度是通过其他方法测量的，例如通过精密称重量的方法计算而得。只需要把待测量厚度的透明膜拿来与样板膜进行比对，在同样复色光的照射下，颜色相同的就是厚度相等的，用这种方法测量精度可到 10−8 m 的数量级。

给光学器件表面敷膜，有一个绕不过去的问题，那就是“半波损”的问题。所谓“半波损”，是指当光线从光疏介质射向光密介质，在两种介质的界面处发生反射时，反射光线与入射光线发生 180° 的相位突变，称为“半波损”，而在从光密介质射向光疏介质时，不发生“半波损”。在前面讲的肥皂膜（两面是空气，中间是液体）干涉时，其前表面要发生“半波损”而后表面不发生“半波损”；两层玻璃间的空气膜发生干涉时，其前表面不发生“半波损”而后表面要发生“半波损”。这两种情况下的等厚条纹的明暗条件都要反过来，即膜的厚度 *h* 满足下列条件：

我们前面并未提及这个问题，这是因为在我们观察等厚条纹时，发现只是明、暗条纹位置发生了对调，其他情况都没有改变，而我们测量时关注的主要是相邻条纹的间距与波长的关系，明、暗条纹位置的对调对测量没有影响。但在讨论光学器件表面敷膜的问题时，这个问题就变得非常重要，为了使膜的两个表面反射都出现或都不出现“半波损”，要使膜的折射率介于两边介质的折射率之间，例如制作透镜的材料折射率为 *n*2，空气的折射率为 *n*1，敷膜材料的折射率为 *n*ʹ，必须满足 *n*1 < *n*ʹ < *n*2。

## 三、薄膜干涉中的等倾条纹

如果干涉条纹是按照等倾角光线交点的轨迹分布的，则称为等倾条纹。等倾条纹是无穷远处的干涉条纹，即是由薄膜表面处彼此平行的反射光线产生的，观察无穷远处等倾干涉条纹的装置如图 9 所示，其中图 9（a）是平面图，图 9（b）是立体图，点光源 S 发出的光束经半反半透镜 M 的反射而照射到厚度均匀的薄膜上，薄膜前、后表面反射的光线透过 M 而射到凸透镜 L 上，L 的光轴垂直于薄膜表面，接收屏幕位于凸透镜 L 的焦平面上，透镜 L 把彼此平行的光线会聚于屏幕上的一点，例如图 9（a）中的两条平行光线会聚于屏幕上的 P 点。不难看出，P 点到屏幕中心 O 点的距离只决定于倾角 *i*，具有相同倾角的反射光线排列在同一个圆周上，它们在屏幕上的交点的轨迹是以 O 为圆心的圆，即屏幕上的干涉条纹是以中心 O 点为圆心的同心圆，这就是等倾干涉条纹。

图 9 观测液膜等倾干涉条纹的装置

（a）

（b）

厚度均匀的薄膜

半反半透镜

光源

凸透镜

O

屏幕

S

M

L

*i*

O

P

屏幕

在前面图 7 所示的检验透镜曲率的装置中，我们看到的干涉条纹也是一系列的同心圆，但那是等厚条纹而不是等倾条纹。等厚干涉条纹与等倾干涉条纹的不同点主要有：

（1）等厚条纹是薄膜表面处的干涉条纹，而等倾条纹是无穷远处的干涉条纹

从薄膜前、后表面反射回来的两条相干光线如果是平行的，则它们只能相交于无穷远处，当我们利用凸透镜把它们会聚起来，必定会聚于透镜的焦平面上，因此观察等倾条纹时，屏幕与透镜的距离等于它的焦距。

不同的两条相干光线如果相交于薄膜表面，那么从这点出发，这两条光线就是发散的，要利用凸透镜把它们会聚起来，会聚点必定在焦平面之外，因此观察等厚条纹时，屏幕与透镜的距离大于它的焦距，设透镜与薄膜的距离为 *u*、透镜焦距为 *f*、透镜与屏幕的距离为 *v*，则三者满足

+ =

我们的眼睛是可以自动调焦的，因此等厚条纹和等倾条纹都可以不使用凸透镜加屏幕的观察方法，而直接用眼睛从正上方观察。但如果我们只是对着透明度很好的薄膜观察，虽然能看到干涉条纹，却不能确定我们的眼睛聚焦在哪个平面上，也就不能判断我们观察到的到底是哪个位置上的干涉条纹。这时我们可以借助于一个参照物帮助眼睛聚焦，例如用手拿着一张白纸，把它放在薄膜所在的平面处，先观察白纸，等眼睛聚焦于这个平面上，再集中注意观察干涉条纹。这时看到的就可以被认为是等厚条纹，而撤去白纸，眼睛先观察远方的物体，例如窗外远处的楼房或树木等，待眼睛聚焦于远方时，再观察干涉条纹，则看到的就可以被认为是等倾条纹。

（2）严格的等厚条纹，必须让光线处处都正入射，这样才能将倾角这个无关变量控制住，从而使得条纹严格地按照薄膜厚度分布。因此扩展光源对观察等厚条纹是有负面影响的，这是因为扩展光源上不同的发光点发出的光是不相干的，并且它们的入射角度也各不相同，因此光源的扩展度越大，条纹的反衬度越小，即越不容易分辨出来，甚至完全看不出干涉条纹。但观察等倾干涉条纹时，扩展光源不但无害而且有利，这是因为扩展光源上不同的发光点发出的光是不相干的，它们各自成一套干涉条纹，但这些条纹都是按倾角不同而分布的，叠加在一起，起到相互加强的作用，因此光源的扩展度越大，对观察等倾条纹越有利。

（3）观察等厚条纹使用的是厚度不均匀的薄膜，观察等倾条纹使用的是厚度均匀的薄膜

如果使用厚度不均匀的薄膜，在透镜的焦平面上接收干涉条纹，则观察到的既不是等倾条纹也不是等厚条纹。这是因为屏幕位于凸透镜的焦平面上，决定了它只能把平行光束聚集到屏幕上的某点。屏幕上的干涉条纹是等亮度点的轨迹，即同一条干涉条纹的光程差 Δ*L* 是常数，而光程差 Δ*L* 与厚度 *h* 和光线的倾角 *i* 都有关系（Δ*L* ≈ 2*nh*·cos*i*），因此条纹既不是等倾条纹也不是等厚条纹。

## 四、使用麦克尔逊干涉仪观测各种干涉条纹

麦克尔逊干涉仪的设计构思非常巧妙，它把光源、两个反射面及接收器（观察者）分别放置在空间的东、西、南、北四个方向上，而其中心则是一块半反半透镜 M，其简单的光路图如图 10 所示。光源射出的光束①经 M 分成强度大致相等的两束②和③，分别射向平面镜 M1 和 M2，垂直反射回来后又射到 M 上，②反射成为④，③则透射成为⑤，④和⑤平行射向观察者。图 11 则有意画出一束稍微倾斜的光束，它们分成两束后经 M1 和 M2 的反射，再经过 M 后平行射向凸透镜 L，最后成像在屏幕上，当然也可以不用透镜和屏幕，而是直接用眼睛观察。

M

M1

M2

③

②

④

⑤

①

O

*x*

*y*

图 10 麦克尔逊干涉仪

M

M1

M2

O

图11 麦克尔逊干涉仪的光路示意图

M1ʹ

L

屏幕

图中 M1ʹ 是 M1 经半反镜 M 反射后形成的虚像，在观察者看来，两束相干的光线分别是从 M1ʹ 和 M2 射来的，M1ʹ 与 M2 之间有一层空气膜，因此观察者看到的现象与薄膜干涉现象相同，特别是平画镜 M1 和 M2 的位置都可以精确调节，因此薄膜干涉中的诸如等厚条纹、等倾条纹以及条纹的变动等各种情况都可以观察到，并且可以很方便地在光路中插入其他器件，从而方便地进行各种精密测量。可以说麦克尔逊干涉仪是许多近代干涉仪的原型。

如果 M1ʹ 与 M2 之间保持平行，即二者中间是厚度均匀的空气膜，屏幕调节在透镜的焦平面上，则屏幕上出现的是同心圆形的等倾干涉条纹。如果 M1ʹ 与 M2 之间有一微小夹角，即二者中间是厚度均匀变化的楔形空气膜，适当调节屏幕的位置，就可以接收到间隔均匀的等间距的等厚条纹。图 12 是麦克尔逊干涉仪上产生的各种干涉条纹及相对应的 M1ʹ 与 M2 的位置，其中（a）、（b）和（d）、（e）都是等倾条纹，（h）是等厚条纹，（g）和（i）是不严格的等厚条纹，（c）由于 M1ʹ 与 M2 重合，不产生干涉，（f）和（j）则由于楔形空气膜太厚，干涉条纹的反衬度太低，以至于分辨不出来条纹在哪了。

M2

图 12 M1ʹ 与 M2 间的相对位置及产生的干涉图样

M1ʹ

M2

M1ʹ

M1 ʹ 和 M2 重合

M2

M1ʹ

M2

M1ʹ

M2

M1ʹ

M2

M1ʹ

M2

M1ʹ

M2

M1ʹ

（a）

（b）

（c）

（d）

（e）

（f）

（g）

（h）

（i）

（j）

M1 ʹ 和 M2 重合