

实验 7. 光的干涉

光的干涉现象是光的波动性的一种表现。牛顿环（Newton's ring）是一种用分振幅的方法实现的定域等厚干涉现象，最初由牛顿发现。牛顿通过测量同心圆的半径算出了凸透镜和平面玻璃板之间对应位置空气层的厚度，但他主张光的微粒说而未能对它做出正确的解释。19 世纪初，托马斯·杨从光的波动性出发，用光的干涉原理解释了牛顿环现象，并参考牛顿的测量结果计算了不同颜色的光波对应的波长和频率，推动了光学理论特别是波动理论的建立和发展。直到现在，牛顿环仍被广泛应用于测量透镜的曲率半径、检验光学元件表面的平整度，而且测量精密度较高。同样基于光的干涉原理，劈尖干涉也在科研和工程上应用广泛，如测量长度、角度、微小形变、光波波长，检测加工工件表面的平面度、光洁度、粗糙度以及机械零件的内应力分布等。

一、实验目的

- （1）观察劈尖干涉和牛顿环两种光的等厚干涉现象。
- （2）学习利用牛顿环测量球面曲率半径，以及劈尖干涉法测量细丝直径的方法。
- （3）掌握读数显微镜的调节和使用方法。

二、实验仪器

读数显微镜，钠光灯，牛顿环装置，光学平面玻璃。

三、实验原理

两列频率相同、相位差恒定、振动方向一致、强度相差不大的波相遇时，在相遇的区域内，由于两列波的叠加，有些地方振动总是加强的，而另一些地方总是减弱的（甚至合成光强为零）。形成的这种稳定的强度不均匀的现象，称为光的干涉。

1. 牛顿环

牛顿环装置如图 1 所示。用一个曲率半径很大的平凸透镜，将其凸

面放置在另一块光学平板玻璃上即构成了牛顿环装置,这时在透镜凸面和平面玻璃板之间形成一个空气间隙层。间隙层的厚度从中心接触点向四周边缘逐渐增厚。当一束单色平行光垂直地入射到平凸透镜上,则空气间隙层上下表面反射的两束光存在光程差,它们 在平凸透镜的凸面上相遇时就会产生干涉现象。由于以接触点为圆心的同一圆周上各点的空气隙相等,所以干涉条纹是一系列以接触点为圆心的明暗相间的同心圆,这些等厚干涉条纹即为牛顿环,如图 2 所示。

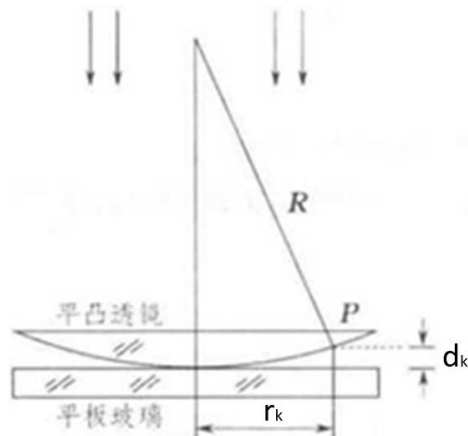


图 1. 牛顿环实验装置

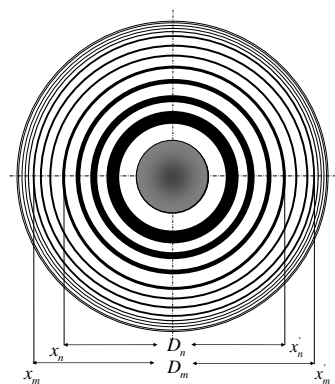


图 2 牛顿环干涉条纹

设入射光的波长为 λ ，第 k 级干涉环的半径为 r_k ，该环各点空气隙厚度均为 d_k ，考虑空气隙折射率 n 近似为 1，则由图 1 可得空气隙上、下表面两反射光的总光程差为

$$\Delta_k = 2d_k + \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

其中 $\lambda/2$ 是由于空气隙下表面反射的光线是从光疏介质（空气）向光密介质（玻璃）入射光的反射，反射光有一大小为 π “半波损失”所引起的。

再由几何关系并结合勾股定理，可得空气间隙层厚度 d_k 、透镜凸面曲率半径 R 及干涉环暗条纹的半径 r_k 之间有着如下关系：

$$R^2 = (R - d_k)^2 + r_k^2 = R^2 - 2Rd_k + d_k^2 + r_k^2 \quad (2)$$

通常 R 在数十厘米乃至数米，而 d_k 最大也不超过几毫米，即

$R \gg d_k$ ，所以 $d_k^2 \ll 2Rd_k$ ，略去 d_k^2 项后由（2）式得

$$d_k \approx \frac{r_k^2}{2R} \quad (3)$$

当光程差为半波长的奇数倍时，即

$$\Delta_k = 2d_k + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (4)$$

干涉产生暗条纹。联立式（3）和（4）易得暗条纹的半径为

$$r_k = \sqrt{kR\lambda} \quad (5)$$

可见 r_k 与 k 的平方根成正比，随 k 的增大，环纹愈来愈密且愈来愈细，如图 2 所示。特别地，由式（4）直接可得暗条纹的空气间隙层厚度满足

$$2d_k = k\lambda$$

（6）

由此可见，接触点处 $d_k = 0$ 对应的是**零级暗条纹**。

当光程差为半波长的偶数倍时，即

$$\Delta_k = 2d_k + \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2} \quad (7)$$

干涉产生明条纹。将式（3）代入式（6）易得明条纹的半径为

$$r_k = \sqrt{\frac{(2k-1) R \lambda}{2}} \quad (k=0, 1, 2, \dots) \quad (8)$$

由式（3）和式（4）可知，如果入射光波长 λ 已知，测出第 k 级暗环或明环的半径 r_k ，即可测出凸透镜的曲率半径 R ；反之，如果 R 已知，测出 r_k 后，就可计算出入射单色光源的波长 λ 。但是直接测量半径 r_k 往往误差很大，原因在于无法确定牛顿环的几何中心。实际上，凸面和平面不是理想的点接触，接触压力会引起局部形变，使接触处成为一个圆面，干涉环中心不是一个点而是一个暗斑。另外，镜面上也可能有尘埃存在，从而引起附加的光程差，导致干涉环中心不是一个点而是一个暗斑或半明半暗的斑，使得环中心和级次 k 都无法确定。再考虑人眼对视场中的暗纹更加敏感，所以通常采用直接测量两个暗环直径 D 的方法来间接测量透镜曲率半径 R 。由式（5）得

$$R = \frac{r_m^2 - r_n^2}{\lambda (m - n)} = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4\lambda (m - n)} \quad (9)$$

式中 D_m 和 D_n 值分别对应 m 级和 n 级暗环的直径， m 和 n 值可以任取。显然，由于直径的平方差等于弦的平方差，因此实验中可以不严格地确定出环的中心，从而有利于消除系统误差。若测量多个直径 D 时还可以用逐差法或者图解法求 R 。

2. 劈尖干涉

如图3所示，将两块光学平面玻璃板叠在一起，在其一端放置细玻璃丝（或薄片等）并使其平行于相交之棱边，这样就在两玻璃板之间形成了劈尖型的空气隙，这样的装置称为劈尖。

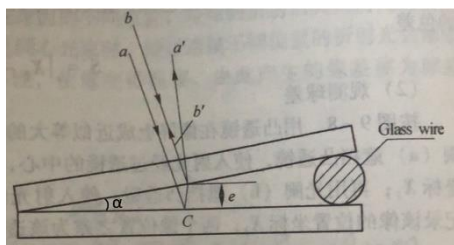


图3 劈尖干涉原理图

当单色的平行光垂直（入射角 $i=0$ ）入射到两平面玻璃形成的空气劈（空气折射率 $n=1$ ）时，在劈尖上下两表面反射的两束光 a' 、 b' 产生干涉，形成明暗相间的条纹，如图4所示。

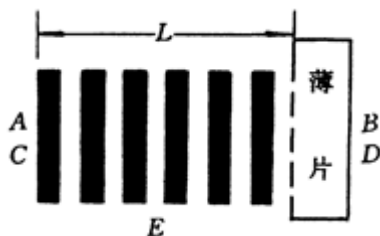


图4 劈尖干涉条纹

设图中 C 处薄膜厚度为 e ，则根据该处的光程差 δ 以及薄膜干涉的公式有

$$\begin{cases} \delta = 2e + \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2} & k = 1, 2, 3, \dots \text{明条纹} \\ \delta = 2e + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} & k = 0, 1, 2, \dots \text{暗条纹} \end{cases}$$

(10)

因为与两玻璃交线棱边平行处的薄膜厚度相等，因而光程差相等，所以劈尖的干涉条纹是一系列与棱边交线平行的明暗相间直线型等厚干涉条纹。式(10)表明光程差 δ 与膜厚 e 为线性关系，故条纹是等宽、等间距的。特别地，在两块玻璃相接处 $e=0$ ，两光束的光程差为 $\delta = \lambda/2$ ，所以应看到暗纹。设第 k_1 条暗条纹处的劈尖厚度为 e_1 ，第 $k_1 + \Delta k$ 暗纹处的劈尖厚度为 e_2 ，这两条暗纹间的横向水平距离为 x ，而两暗纹处劈尖厚度差为 Δd ，则

$$\Delta d = e_2 - e_1 = \Delta k \cdot \lambda / 2$$

(11)

$$\tan \alpha = \Delta d / x = \Delta k \lambda / 2x \quad (12)$$

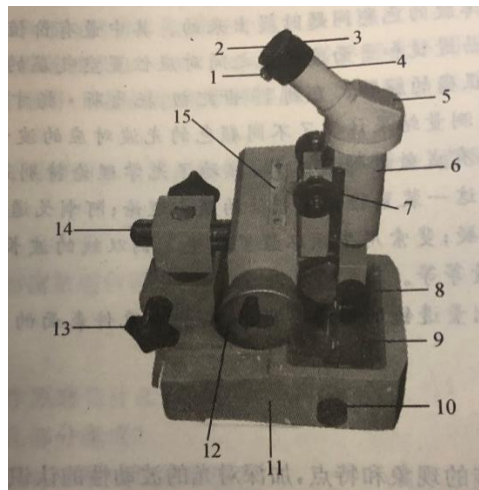
$$\text{细丝直径(或薄片厚度)} \quad D = L \cdot \tan \alpha = L \lambda \Delta k / 2x \quad (13)$$

式中 L 是细丝中心与劈尖端的水平距离。因此，只要知道入射光波长，测出 L 、 x ，即可由式 (13) 求出细丝的直径。

四、仪器介绍

1. 读数显微镜结构

JCD-3 型读数显微镜的外形结构如图 5 所示，它由螺旋测微装置和显微镜两部分组成，可用来精确测量微小长度。显微镜的总放大率为 30 倍（物镜 3x，目镜 10x），视场直径 4.8mm，测量范围为 0~50mm，测量精度为 0.02mm。读数由主尺读数和测微鼓轮读数组成。主尺刻度每小格 1mm；测微鼓轮上有 100 个等分格，每格 0.01mm，测微鼓轮每转一圈，显微镜在主尺上移动 1mm。测量值为主尺读数加测微鼓轮读数，主尺读数只读取整数位，测微鼓轮应估读一位。



1.锁紧螺钉；2.目镜；3.目镜锁紧圈；4.目镜接筒；5.棱镜室；6.镜筒；7.调焦手轮；8.反射镜
调节手轮；9.载物台；10.反光镜旋轮；11.底座；12.鼓轮；13.锁紧手轮；14.横轴；15.标尺

图 5 读数显微镜

2. 显微镜调节与测量方法

(1) 调节目镜：把待测物体放置于载物台，旋转目镜，使其分划板上的十字叉丝清晰；转动目镜，使十字叉丝中的一条线与显微镜的移动方向相垂直。

(2) 调节镜筒：旋转调焦手轮，使视场中看到的物像清晰，并清除视差（即眼睛左右移动时，叉丝与物像间无相对位移）。

(3) 测量读数：转动测微鼓轮，使十字分划板的纵叉丝移出被测范围之外，再反向转动鼓轮使其纵叉丝与被测物体的起点重合（避免空程差的影响），记下此位置主尺与鼓轮上的值；沿同方向继续转动鼓轮，使纵叉丝与被测物体的终点重合，记下此位置主尺与鼓轮上的值。将上述两位置上的测量值 x_1 、 x_2 相减即为被测物体长度 $L = |x_2 - x_1|$ 。

3. 实验光路

实验光路如图 3 所示，钠光灯发出波长 $\lambda = 589.3 \text{ nm}$ 的单色光射向显微镜半反镜（固定在显微镜镜筒物镜下端与镜筒成 45° 角的玻璃片），经反射后垂直射向置于平台上的牛顿环（或劈尖），产生的干涉图样垂直向上穿过半反镜再射向显微镜，从目镜中即可观察到放大后的干涉图像。

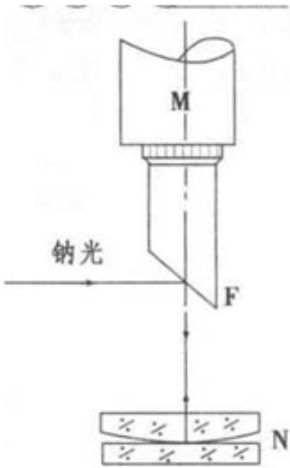


图 6 观察光路图

五、测量前准备

- 1. 开启钠光灯电源，并使钠光灯正对 45° 反射平面玻璃且与之等高。
- 2. 转动鼓轮，使显微镜筒位于平台中部 25mm 读数处，再将牛顿环装置（或劈尖）放于平台中部，调整半反镜位置，使从目镜中看到的视野最亮。
- 3. 调节目镜，使“十”字形叉丝清晰，锁紧紧固螺钉。眼睛离开目镜侧视，调节调焦手轮使镜筒下降至接近牛顿环玻璃片（或劈尖平面玻璃），然后边升高物镜边在目镜中观察，直到视场中看到的干涉图样清晰、均匀、明亮。

六、实验内容与步骤

1. 利用牛顿环测量透镜曲率半径

- （1）定性观察牛顿环各级条纹的粗细、条纹之间的间隔等特征。
- （2）调节牛顿环位置，使叉丝交点与牛顿环中心大致重合，并使水平叉丝与标尺平行。
- （3）转动测微鼓轮，先使镜筒由牛顿环中心向一侧（左或右）移动，顺序数到第 17 暗纹，再反向转动鼓轮使叉丝中心对准第 15 暗纹中央（ $m=15$ ），记下读数 x_{15} 。继续转动鼓轮，测出第 5 暗环（ $n=5$ ）位置的读数 x_5 。继续转动鼓轮，使镜筒经过圆心，再测出另一侧第 5 暗环和第 15 暗环的位置 x'_5 和 x'_{15} 。显然，环的直径即为该环对应的左右位置读数之差 D_{15} 和 D_5 。重复测量 5 次，将数据填入表 1 中。

表 1 利用牛顿环测量透镜曲率半径数据记录表（单位：mm）

	x_{15}	x_5	x'_5	x'_{15}	$D_{15}= x_{15}-x'_{15} $	$D_5= x_5-x'_5 $
1						
2						

3						
4						
5						

2. 利用劈尖干涉测量细丝直径

（1）在两玻璃之间夹上一根细玻璃丝，形成一个空气劈尖，将其置于载物平台中间位置。注意：细丝应尽可能远离劈尖且平行于棱边；劈尖的长边与工作台移动方向平行。

（2）调节显微镜焦距，直到看到清晰的等宽、等间距的平行直线干涉条纹。

（3）使叉丝的交点移到靠近劈尾一边，注意空程差的影响，记录某一暗纹的位置 x_0 ，然后数 30 条暗纹（即 Δk 取 30）记录位置 x_{30} ，两者之差即为 30 条暗纹的距离 x ，将测量数据填入表 2 中。本实验要求重复测量五次，可以连续朝一个方向不断数下去，共数 5 个 30 条，这样可以避免来回数时每次都要考虑空程差的影响。

（4）转动鼓轮使叉丝中心对准劈尖棱边（一定为暗条纹），读出读数 L_0 ，再继续转动鼓轮，读出叉丝中心对准细丝的读数 L_N ，则劈尖（细丝到棱边）总长度 $L = |L_N - L_0|$ 。重复测量 5 次，将数据填入表 2 中。

表 2 利用劈尖干涉测量细丝直径数据记录表(单位：mm)

	x_0	x_{30}	$x = x_{30} - x_0 $	L_0	L_N	$L = L_N - L_0 $
1						
2						
3						
4						
5						

七、数据处理

1. 由表 1 的测量数据，先计算出直径 D_{15} 和 D_5 的平均值和不确定度，再利用式 (9) 计算牛顿环的曲率半径 R ，并计算 R 的不确定度，给出 R 测量结果的最终表达式。计算中钠光波长取钠灯双黄线的波长平均值 589.3nm ，仪器允许误差极限 $\Delta_{\text{ins}}=0.005\text{mm}$ 。
2. 由表 2 的测量数据，先计算出 30 条暗纹的长度 x 和劈尖总长度 L 的平均值和不确定度，再利用式 (13) 计算玻璃丝的直径 D ，并计算 D 的不确定度，给出 D 测量结果的最终表达式。

八、注意事项

1. 读数显微镜调焦时，应使镜筒由下至上调节，避免碰伤牛顿环。
2. 为避免由于读数显微镜螺旋空程而引入的隙动差，测量过程中测微鼓轮只能沿单向转动，不能回复。
3. 实验过程中，不要用手触摸光学平面，不要旋转超量程。

九、思考题

1. 在牛顿环实验中，反射光与透射光所形成的干涉条纹有什么不同？
2. 劈尖干涉实验中所得到的干涉条纹并不与棱完全平行，解释这是什么原因造成的？
3. 在测量牛顿环的平凸透镜曲率半径 R 时，如果在实验中测 r_m 与 r_n 时，未通过干涉圆条纹中心，是否仍可以使用公式 $R = \frac{r_m^2 - r_n^2}{(m - n)\lambda}$ ？