

实验十四 用 CCD 成像系统观测牛顿环

“牛顿环”是一种分振幅等厚干涉现象，是光的波动性的一种表现。“牛顿环”在光学加工中有广泛的应用，例如，利用它可精确地检验光学元件表面的质量，并测试压力与形变的关系等。

CCD (Charge-Coupled Device, 电荷耦合器件) 在图象传感和非接触测量领域发展迅速。用 CCD 观测牛顿环，具有直观，精确度高，图象可保存等优点。

【实验目的】

1. 在进一步熟悉光路调整的基础上，用透射光观察等厚干涉现象——牛顿环；
2. 学习利用干涉现象测量平凸透镜的曲率半径。

【实验原理】

牛顿环仪是由一块曲率半径较大的平凸透镜放在光学平玻璃上构成，平玻璃表面与凸透镜球面之间形成一楔形的空气间隙。当用平行光照射牛顿环仪时，在球面与平玻璃接触点周围就形成了同心圆干涉环——牛顿环。我们可以用透射光来观察这些干涉环，由于空气隙的边界表面是弯曲的，干涉环之间的间距是不等的。

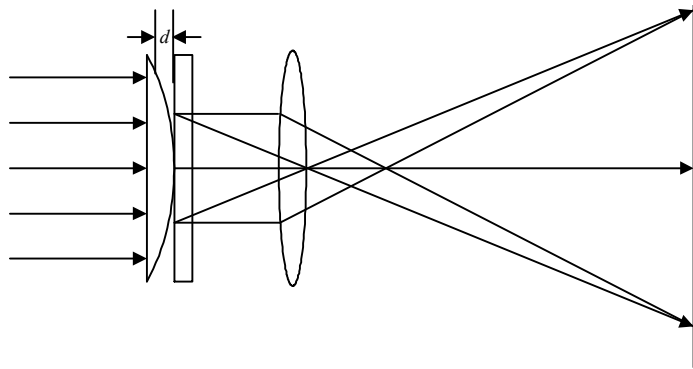


图1 透射式牛顿环原理图

在图2中，一束光L从左面照在距离为d的空气楔处。部分光T₁在气楔的左面边界反射回去。部分光T₂通过气楔。在气楔的右面边界有部分光T₃反射回来，由于此处是从折射率大的平玻璃面反射，所以包含一个相位变化。部分光T₄先从气楔右边界反射回来，然后又从气楔的左面边界反射回来，每一次反射均有一个相位变化（即半波损失）。图2表示两束光T₂和T₄形成透射干涉的原理。T₂和T₄的光程差Δ为

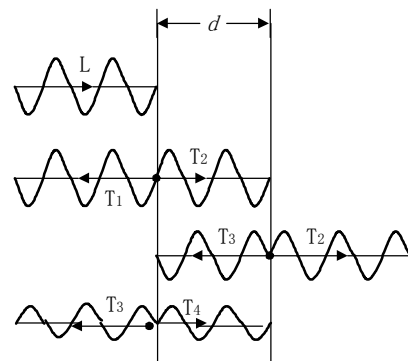


图2 光通过空气楔干涉的图介

$$\Delta = 2d + 2 \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

形成亮纹的条件: $\Delta = n \cdot \lambda$ ($n = 1, 2, 3, \dots$ 表示干涉条纹的级数), 即

$$d = (n-1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

当二块玻璃相接触时 $d = 0$, 中心形成亮纹.

对于由平凸透镜和平玻璃所形成的气楔, 气楔的厚度取决于离平凸透镜与平玻璃接触点的距离. 换言之, 取决于凸透镜的弯曲半径. 图 3 说明了这样的关系.

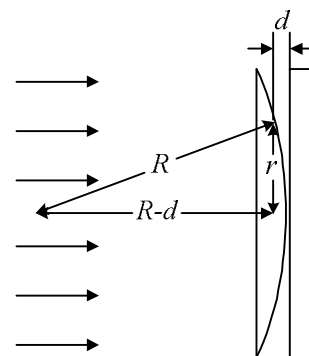


图 3 平凸透镜与平玻璃之间气楔的图介

$$R^2 = r^2 + (R-d)^2$$

$$d = \frac{r^2}{2R} \quad (d \ll R) \quad (3)$$

对于小的厚度 d , 干涉环即牛顿环的半径可以用下式来计算

$$r_n^2 = (n-1) \cdot R \cdot \lambda \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

当平凸透镜与平玻璃的接触点受到轻压时, 我们必须相应修正公式 (3), 近似公式为

$$d = \frac{r^2}{2R} - d_0 \quad r \geq \sqrt{2R \cdot d_0} \quad (5)$$

对于亮环 r_n 的关系如下

$$r_n^2 = (n-1) \cdot R \cdot \lambda + 2R \cdot d_0 \quad n = 2, 3, 4 \dots \quad (6)$$

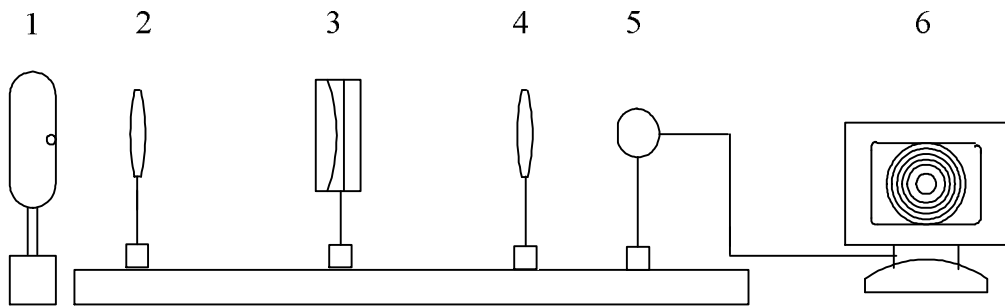
【实验仪器】

钠灯 (中心波长 589.3 nm)、牛顿环、透镜 ($f = 85 \text{ mm}$)、光屏、定标狭缝板、CCD 摄像头 (35 万像素) 和计算机系统等.

【实验内容】

1. 调整光路, 观察透射式牛顿环

- (1) 按图 4 布置各元件及装置。
- (2) 按同轴等高调整各光学元件. 将各元件靠拢, 调整各元件中心等高在一条直线上, 并使各元件光学平面互相平行.
- (3) 调整钠灯的位置, 使之处于透镜的焦点上, 并用光屏观察透镜后的光斑, 直至移动光屏, 光斑大小不再变化, 此时从透镜出射的平行光均匀照亮牛顿环.
- (4) 调整透镜, 使牛顿环处于透镜的两倍焦距以外, 移动 CCD 摄像头的位置, 直至显示器上呈现大小适中, 清晰的牛顿环, 此时中央环是亮斑.



1. 钠灯; 2. 透镜; 3. 牛顿环; 4. 透镜; 5. CCD; 6. 计算机系统

图 4 实验装置示意图

2. 用钠灯来测量平凸透镜的曲率半径 R :

(1) 用计算机读取牛顿环亮环从第 2 环至 11 环的数据 (具体操作参阅实验室提供的参考资料).

(2) 记录牛顿环、透镜与摄像头在导轨上的位置.

3. 定标

计算机屏上显示的 r'_n 是 CCD 摄像头中牛顿环像的半径, 它是以像元为单位, 必须将 r'_n 换算成 mm 单位. 因此, 须通过定标求出 1 mm 所对应的像元数.

(1) 将图 4 中的牛顿环换成定标狭缝板, 调节透镜与 CCD 的位置, 直至在显示器上呈现清晰的狭缝像.

(2) 用计算机读取狭缝像宽度所对应的像元数 x (具体操作参见实验室提供的参考资料). 根据成像放大率公式, 狭缝像的宽度 $L' = (v/u)L$ (mm), 其中 u 为狭缝的物距, v 为狭缝的像距, L 为狭缝的宽度. 因此, 1 mm 所对应的像元数为 x/L' . 如上所述, 读取三组数据, 计算 1 mm 所对应的像元数的平均值.

【数据处理】

通过定标求出的 1 mm 所对应的像元数, 将 r'_n 换算成 mm 单位, 根据透镜成像公式, 由已知像的半径分别算出牛顿环对应的半径 r_n .

利用所得数据作 r_n^2 与 n 关系图, 并求斜率 α (用最小二乘法验证)、平凸透镜的曲率半径 R 和 d_0 .

【思考题】

1. 对于同一牛顿环装置，反射式干涉环与透射式干涉环有什么异同之处？
2. 公式 $d = \frac{r^2}{2R} - d_0$ 中 d_0 表示什么意义？
3. 当用白光照射时，牛顿环的反射条纹与单色光照射时有何不同？