

# 实验二 光学衍射测量

## 一 实验目的

1. 了解激光衍射计量原理, 利用衍射计量法测量狭缝缝宽。
2. 了解爱里圆测定方法, 利用爱里圆测定法测量微孔直径。
3. 深刻理解互补原理, 并以此测量细丝直径。

## 二 实验原理

### 2.1 缝宽的衍射测量

激光衍射计量的基本原理是激光束的夫朗和费衍射效应, 夫朗和费衍射是一种远场衍射。衍射计量是利用被测物与参考物之间的间隙所形成的远场衍射图样来完成。当激光照射被测物与参考的标准物之间的间隙时, 其衍射图样相当于单缝的远场衍射。当入射平面波的波长为 $\lambda$ , 入射到长度为 $L$ , 宽度为 $w$ 的单缝上 ( $L > w > \lambda$ ), 并与观测屏距离 $R \gg w^2/\lambda$ 时, 在观测屏 $E$ 的视场上将看到十分清晰的衍射条纹, 其原理如图 2.1所示。在观察屏 $E$ 上由单缝形成的衍射条纹, 其光强 $I$ 的分布由物理光学可知为[8]:

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \beta}{\beta^2} \quad (2.1)$$

式中 $\beta = (\pi w/\lambda) \sin \theta$ ,  $\theta$ 为衍射角,  $I_0$ 是 $\theta = 0$ 时的光强, 即光轴上的光强度。

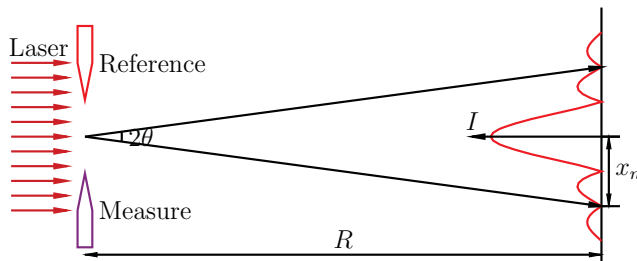


图 2.1: 一维狭缝的衍射计量原理图。

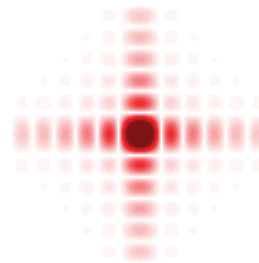


图 2.2: 二维方孔的衍射图形。

方程2.1就是远场衍射光强分布的基本公式, 说明衍射光强是随 $\sin \beta$ 的平方而衰减。当 $\beta = 0, \pm\pi, \pm 2\pi, \pm 3\pi, \pm n\pi$ 处将出现强度为零的条纹, 即 $I = 0$ 的暗条纹。测定任一个暗条纹的位置变化就可以知道间隙 $w$ 的尺寸。这就是衍射计量的原理。

因为 $\beta = (\pi w/\lambda) \sin \theta$ , 对暗条纹则有 $(\pi w/\lambda) \sin \theta = n\pi$  当 $\theta$ 不大时, 从远场条件可得

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{x_n}{R}$$

式中:  $x_n$ 为第 $n$ 级暗条纹中心距中央零级条纹中心的距离,  $R$ 为观察屏距单缝平面的距离。最后写成:

$$w = Rn \frac{\lambda}{x_n}$$

这就是衍射计量的基本公式。为计算方便, 设 $x_n/n = t$ 为衍射条纹的间隔, 则

$$w = \frac{R\lambda}{t}$$

已知 $\lambda$ ,  $R(R = f)$ , 测定两个暗条纹的间隔 $t$ , 就可计算出 $w$ 的精确尺寸。当被测物尺寸改变 $\sigma$ 时, 相当于狭缝尺寸 $w$ 改变了 $\sigma$ , 衍射条纹中心位置随之改变, 则

$$\sigma = w - w_0 = n\lambda R \left( \frac{1}{x} - \frac{1}{x_0} \right)$$

式中 $w_0$ ,  $w$ 分别为起始缝宽和最后缝宽;  $x_0$ ,  $x$ 分别为起始时衍射条纹中心位置和变动后衍射条纹中心位置 (条纹级次 $n$ 不变)。

由一个狭缝边的位置用上式就可以推算另一边的位置, 则被测物尺寸或轮廓完全可由被测物和参考物之间的缝隙所形成的衍射条纹位置来确定。利用激光所形成的清晰衍射条纹就可以进行微米量级的非接触的尺寸测量。

## 2.2 微孔直径的衍射测量

由物理光学知道, 平面波照射的开孔不是矩形而是圆孔时, 其远场的夫朗和费衍射像中心为一圆形亮斑, 外面绕着明暗相间的环形条纹。这种环形衍射像就称为爱里圆, 如图 2.3所示。P点的光强分布为[8, 10]:

$$I_P = f(\theta, \nu) = I_0 \left[ \frac{2J_1(x)}{x} \right]^2 \quad \left( x = \frac{2\pi a \sin \theta}{\lambda} \right)$$

上式就是爱里圆的光强分布式, 当 $x = 0$ , 即中央亮斑, 它集中84%左右的光能量。对第一暗环, 即中央亮斑的直径大小, 由于

$$\sin \theta = \theta = \frac{d}{2f} = 1.22 \frac{\lambda}{2a}$$

得到爱里圆中心亮斑的直径 $d$ 为

$$d = 1.22 \frac{\lambda f}{a}$$

当已知 $f$ ,  $\lambda$ 时, 测定 $d$ 就可以求取 $a$ 值, 即微孔的尺寸。

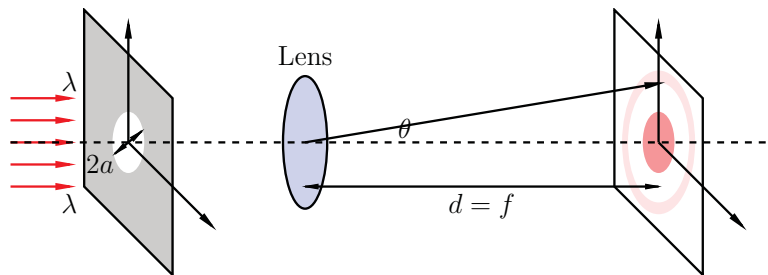


图 2.3: 微孔直径测量原理示意图。

## 2.3 巴俾特原理与细丝直径测量

激光衍射互补测定法的原理是基于巴俾特原理, 如图 2.4所示。设一个任意形状的开孔, 在平面波照射下, 在接收屏上得到的复振幅用 $U_1$ 表示; 用同一平面波照射其互补屏时, 在接收屏上其复振幅用 $U_2$ 表示。当互补屏叠加时 (开孔消失), 那么在接收屏上的光强分布也应消失, 即合成复振幅应为零:

$$U = U_1 + U_2 = 0 \quad (2.2)$$

因此得到 $U_1 = -U_2$ ,  $|U_1|^2 = |U_2|^2$ 的结论。

上式说明, 两个互补屏所产生的衍射图形, 其形状和光强分布完全相同, 仅位相差 $\pi$ , 这就是巴俾特原理。利用这个互补原理, 就可以测定各种细丝和薄带的尺寸。为获得明亮的远场条纹, 一般用透镜在焦面上形成夫朗和费衍射条纹, 如图 2.4所示。设透镜的焦距为 $f'$ , 细丝直径为 $d$ , 则计算公式为:

$$d \sin \theta = n\lambda \quad (2.3)$$

即

$$\sin \theta = \frac{x_n}{\sqrt{x_n^2 + f'^2}}, \quad d = \frac{n\lambda \sqrt{x_n^2 + f'^2}}{x_n}$$

这就是利用巴俾特原理进行测量的原理。

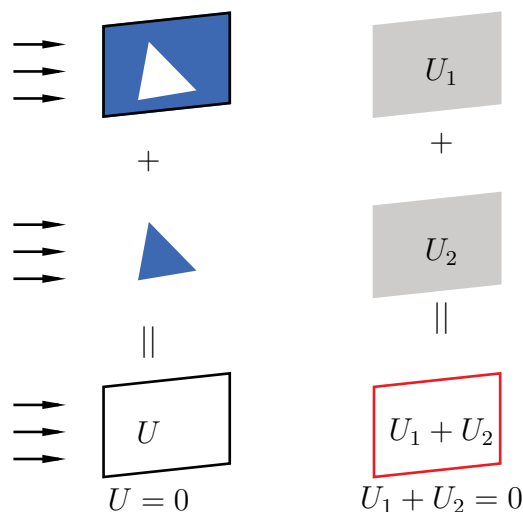


图 2.4: 互补原理进行测量的示意图。

### 三 实验光路以及内容

本实验的主要内容是利用激光衍射原理，测量不同尺寸和形状的狭缝的宽度，以及圆孔的直径。除了样品盒中的样品之外，同学们可以根据自己兴趣测量一些细小物体的尺寸。

#### 3.1 狭缝的衍射测量

##### 光路图

狭缝衍射测量光路如图2.5所示，激光不用扩束，直接照射衍射试件夹19上的试件，在探测器上形成远场衍射条纹，即可测量。注意调节试件、透镜，以及接收器三者之间的相对位置关系。并将测量结果与给定值相比较，分析误差产生的原因。

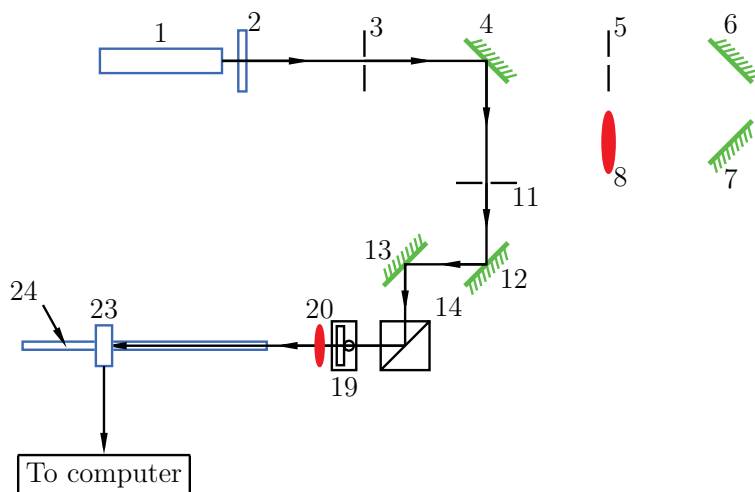


图 2.5: 狭缝衍射测量光路图。

##### 测试样品

所测量的样品见图 2.6, 【注意】衍射试件中缝宽及小孔直径的单位为毫米。出了此处提供的样品之外，同学们可以根据兴趣进行其它细小物体的测量。

##### 操作步骤：

1. 激光不扩束，光路中插入反射镜4及13。
2. 将分光镜14转90°，18试件夹上放黑纸屏或取消试件夹，让透射光直接透射到试验平台之外（避免干扰光的产生）。

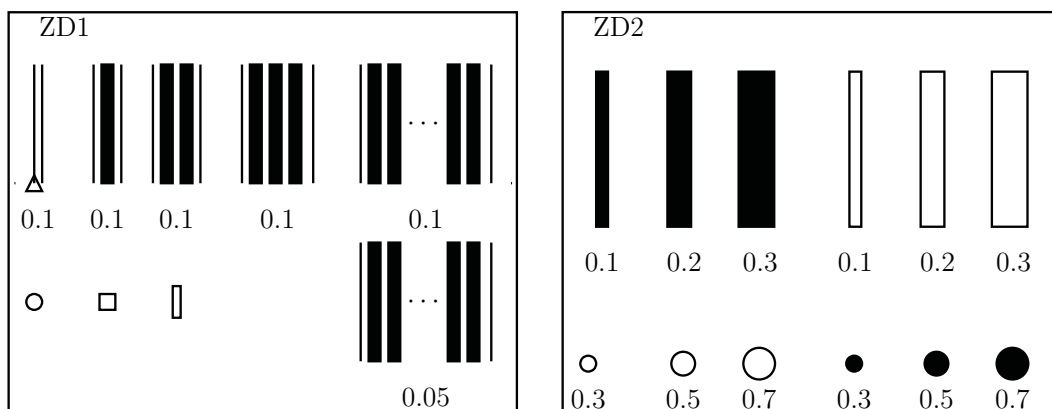


图 2.6: 测量样品示意图。

表 2.1: 狭缝衍射测量实验结果 (其中  $R = 180\text{mm}$ ,  $\lambda = 632.8\text{nm}$ )

	衍射级数( $n$ )	$X_n$	$W$	$\bar{W}$
1				
2				
3				

3. 切换试件夹19中的衍射试件(可调狭缝, 光刻片狭缝系列);
4. 移动CMOS23 使计算机图像清晰, 锁定23;
5. 利用程序记录狭缝系列对应一级、二级、三级衍射条纹间距;
6. 更换不同狭缝, 实现定标和计量;
7. 将实验测量结果记录在表2.1中。

### 3.2 微孔直径的测量

这一部分是通过爱里斑直径的测量, 计算微小圆孔的直径; 测量光路与狭缝测量相同, 只是所测量试件不同。将实验结果记录在表 2.2中。

### 3.3 巴俾特原理测量细丝直径

巴俾特原理测量细丝直径与上面两部分的测量步骤和光路类似, 只是所测量试件为细丝, 将实验结果记录到表2.3中。

实验记录

## 四 思考题

完成实验后, 请思考并回答如下的问题:

1. 用衍射方法测量狭缝宽度时, 实验结果的误差主要来自哪些方面, 如何提高测量精度?

表 2.2: 微孔直径测量实验记录 (其中  $f = 180\text{mm}$ ,  $\lambda = 632.8\text{nm}$ )

	$\alpha$ (爱里光斑直径)	$a$ (小孔直径)
1		
2		
3		
4		

表 2.3: 巴俾特原理与细丝直径测量结果记录

	衍射级( $n$ )	$X_n$	$d$	$\bar{d}$
细丝				
微屏				

- 衍射法测量细丝直径时, 激光光束的横向尺寸大小对测量结果有什么影响? 如何调整激光光束以得到最精确的结果。
- 巴俾特原理的本质是什么? 利用该原理进行测量的优点有哪些? 在什么场合最能发挥其优势?