

### 3.5 单缝衍射光强的分布

光波的波振面受到阻碍时，光绕过障碍物偏离直线而进入几何阴影区，并在屏幕上出现光强不均匀分布的现象叫做光的衍射。研究光的衍射不仅有助于进一步加深对光的波动性的理解，同时还有助于进一步学习近代光学实验技术，如光谱分析、晶体结构分析、全息照相、光信息处理等。衍射使光强在空间重新分布，通过光电转换来测量光的相对强度，是近代测试技术的一个常用方法。光的衍射分菲涅耳近场衍射和夫琅禾费远场衍射两大类，其中夫琅禾费衍射在理论上处理较为简单。本实验仅研究单缝和双缝夫琅禾费衍射。

#### 一、实验目的要求

1. 通过对夫琅和费单缝和双缝衍射光强分布曲线的绘制，加深对光的衍射现象和理论的理解，验证夫琅禾费衍射图样的若干规律。
2. 了解双缝干涉和衍射之间的关系。
3. 掌握用探头测量相对光强分布的方法。

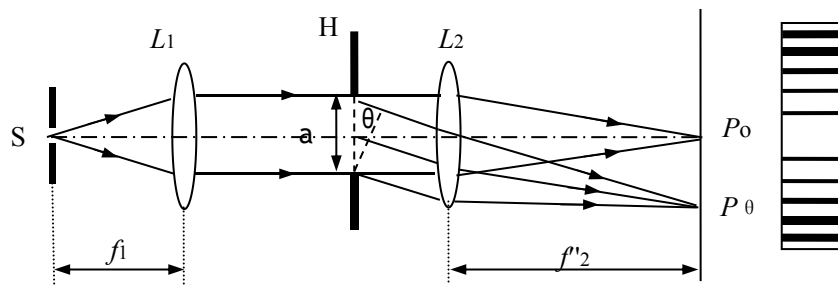
#### 二、仪器用具

光具座、单缝、双缝、探头及其附属支架，氦氖激光器及电源、光电流放大器。

#### 三、实验原理

##### 夫琅和费单缝衍射：

平行光的衍射为夫琅和费衍射，如图一所示，从光源 S 发出的光经透镜 L<sub>1</sub> 形成的平行光，照射在狭缝 H 上，根据惠更斯—菲涅耳原理，狭缝上各点看做是新的子波源，子波源向各方向发出球面次波，这些次波叠加的结果，在透镜 L<sub>2</sub> 的像方焦平面的屏上，可以得到一组平行于狭缝的明暗相间的衍射条纹。



图一

图一中，平行于光轴的衍射光束会聚于屏幕的 P<sub>0</sub> 处，是中央亮条纹的中心，其光强记为 I<sub>0</sub>；与光轴成 θ 角方向的衍射光会聚于屏幕的 P<sub>θ</sub> 处，根据计算结果得出 P<sub>θ</sub> 处光强为：

$$I = I_0 \frac{\sin^2 u}{u^2}, \quad (u = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}) \quad (1)$$

其中 a 为狭缝宽度，λ 为单色光波长。

由(1)式可得单缝衍射光强分布的特征如下：

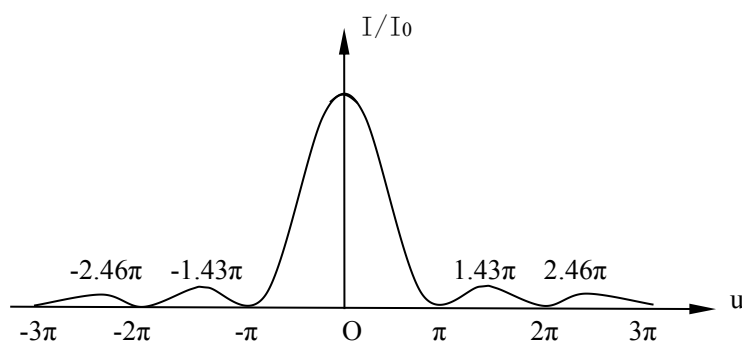
1. 当 u=0 时 θ=0，P<sub>0</sub> 处的光强 I<sub>0</sub> = I<sub>0</sub> 是最大值，称为中央主极大。在其他条件不

变的情况下，此处光强的最大值  $I_0$  与狭缝宽度  $a$  的平方成正比。

2. 当  $u = K\pi$  时 ( $K = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ ) 即  $a \sin \theta = K\lambda$  时,  $I_0 = 0$ , 出现暗条纹。由于  $\theta$  值很小, 可以近似认为暗纹出现在  $\theta = K\lambda/a$  的方向上, 因而主极强两侧暗纹之间的角间距  $\Delta\theta = 2\lambda/a$  为其他相邻暗纹之间角间距  $\Delta\theta = \lambda/a$  的两倍, 如图二所示。

3. 除中央主极大之外, 相邻两暗纹之间都有一次极大。数学计算指出, 这些次极大的位置出现在  $u = \pm 1.43\pi, \pm 2.46\pi, \pm 3.47\pi \dots$ , 其相对光强  $I_0/I_0 = 0.047; 0.017; 0.008 \dots$ 。

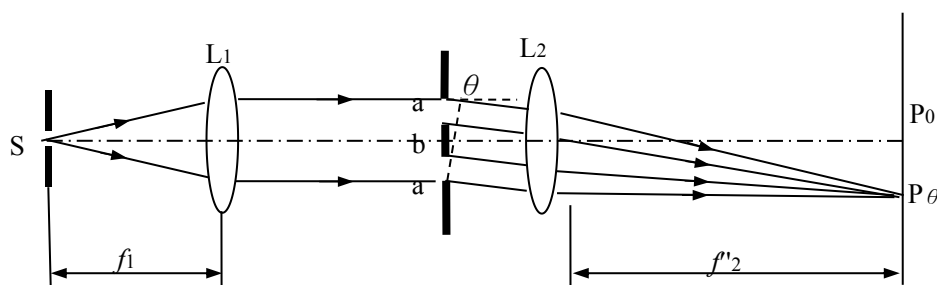
使用氦氖激光器进行此实验时, 由于氦氖激光有良好的方向性, 能量集中, 而且一般衍射狭缝的宽度  $a$  很小, 故准直镜  $L_1$  可省略不用。如果将屏幕放于远离狭缝之处。即  $D$  值远远大于缝宽  $a$ , 如图五所示, 则聚焦透镜  $L_2$  亦可省略。这样夫琅禾费衍射装置就可以简化。



图二

### 夫琅和费双缝衍射:

其处理方法与夫琅和费单缝衍射的处理方法相同, 如图三所示,



图三

设双缝是两个宽度同为  $a$  的狭缝, 中间隔着宽度为  $b$  的不透明部分, 并把  $d = a + b$  称为缝距, 则由计算可得屏幕上  $P_\theta$  处的光强分布为:

$$I_\theta = 4I_0 \frac{\sin^2 u}{u^2} \cos^2 v \quad (2)$$

其中 
$$u = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}, \quad v = \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}$$

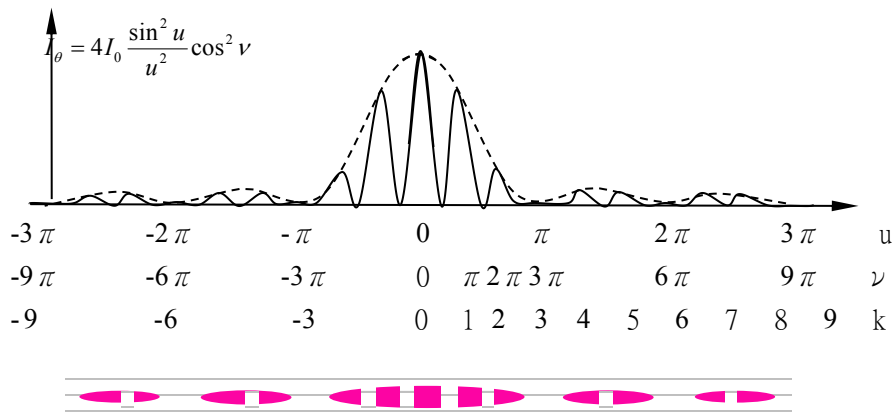
由(2)式可以看出, 因子  $\frac{\sin^2 u}{u^2}$  是宽度为  $a$  的单缝夫琅和费衍射图样的光强分布式, 而因子

$\cos^2 \nu$  是由光强相等而位相差为  $2\nu$  的双光束所产生的干涉图样的光强分布式。因此，夫琅和费双缝衍射可看成是宽度为  $a$  的单缝衍射光强调制下的双缝干涉。如果这两个因子中有一个是零，则合光强为零，就第一个因子  $\frac{\sin^2 u}{u^2}$  来说，光强为零出现在  $u = \pm\pi, \pm 2\pi, \pm 3\pi,$

处，就第二个因子  $\cos^2 \nu$  来说，光强为零出现在  $\nu = \pm\frac{\pi}{2}, \pm\frac{3\pi}{2}, \pm\frac{5\pi}{2},$  ，另外，相位差  $\nu$  和  $u$  之间存在下列关系：

$$\frac{\nu}{u} = \frac{d}{a} = \frac{a+b}{a} \quad (3)$$

由于  $d > a$ ，所以  $\nu$  引起条纹光强的变化较之  $u$  引起的变化来得快，当  $\nu$  取值  $k\pi$  时，本应出现第  $k$  级干涉亮条纹，但如果某一级干涉最大正出现在衍射最小的位置上，则合光强仍为零，即发生了干涉条纹消失的缺级现象。以  $d = 3a$  为例，则缺级发生在  $\frac{\nu}{u} = 3$  以及  $3$  的整数倍的位置上。其光强分布曲线和衍射图样如图四所示。



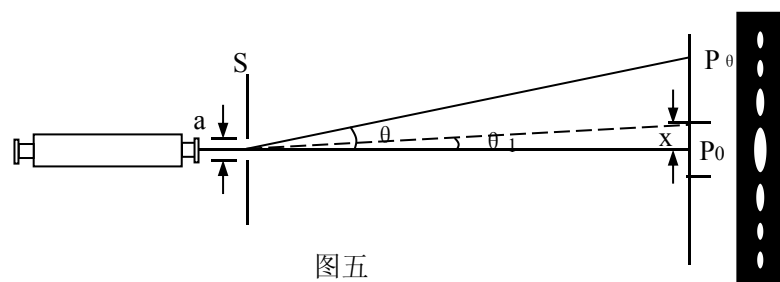
图四

#### 四、实验内容方法

##### (一) 先测单缝衍射光强分布

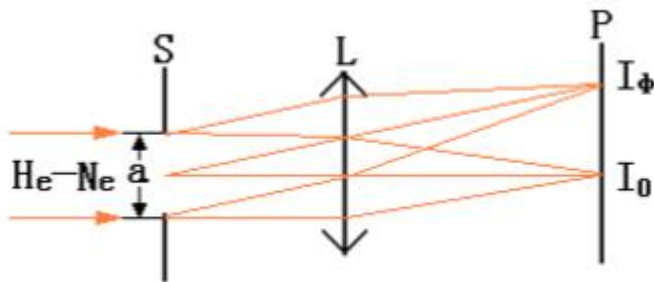
1.按图五所示，在光具座上依次安装好氦氖激光器 A，可调狭缝装置 H，探头 G(或光电二极管)的支架(其可沿垂直于光轴的方向移动，以改变 $\theta$ 角)，用导线连接好探头电极引线光电流放大器，即在导轨上装好实验装置，目测粗调，使各光学元件同轴。

实验光路图：



图五

实验原理图：



注： $I_0$ 为 $P_0$ 处光强

$I_\phi$ 为 $P_\phi$ 处光强

2. 激光器与单缝之间的距离以及单缝与探测器之间的距离均调在 50cm 左右。点燃氦氖激光管，取工作电流不大于 6mA，为保证激光器输出电流稳定，一般半小时以后进行测量。打开光电流放大器。

3. 将光屏置于探测器之前，调二维调节架改变可调狭缝的宽度即择所需的单缝宽度  $a$ ，观察光屏上的衍射条纹使被测量的衍射图样的总长度不小于 4 厘米，调节探头窗口的位置，进而调整出一个图像清晰、对称、条纹宽度适当（约 1cm）的单缝衍射条纹来。（能完整地测量单缝衍射图样的主极强及左右两个次极强）

4. 条纹高度要与接收器口等高。

5. 光电流放大器调节到匹配位置

6. 测量光强分布数据记录：50mm 处找出极大值，单向移动探头窗口位置，可每隔 1 毫米从光电流放大器读出相应位置的光电流强度数值。根据测量数据在坐标纸上作衍射光强分布图，并与理论结果进行比较。

7. 用同样的方法测出双缝衍射（干涉）的光强分布。

**测量：**

记录衍射条纹的光强度（光电流  $I$ ）和相应的位置坐标  $x$

**实验数据记录**

选择单缝记录

| 序号 | 窗口位置 | 电流 | 序号 | 窗口位置 | 电流 | 序号 | 窗口位置 | 电流 |
|----|------|----|----|------|----|----|------|----|
| 1  |      |    | 11 |      |    | 21 |      |    |
| 2  |      |    | 12 |      |    | 22 |      |    |
| 3  |      |    | 13 |      |    | 23 |      |    |
| 4  |      |    | 14 |      |    | 24 |      |    |
| 5  |      |    | 15 |      |    | 25 |      |    |
| 6  |      |    | 16 |      |    | 26 |      |    |
| 7  |      |    | 17 |      |    | 27 |      |    |
| 8  |      |    | 18 |      |    | 28 |      |    |

|    |  |  |    |  |  |    |  |  |
|----|--|--|----|--|--|----|--|--|
| 9  |  |  | 19 |  |  | 29 |  |  |
| 10 |  |  | 20 |  |  | 30 |  |  |

注：应用单缝衍射关系式  $a \sin \theta = K\lambda$  ( $K=1, 2, 3\cdots$ ) 时光强为零的关系，从上面的衍射光强分布图求单缝的缝宽  $a$ 。

提示：当  $K=1$  时  $a = \lambda / \sin \theta$ ， $\theta$  很小时  $\sin \theta = \tan \theta = x_1 / D$ 。其中  $\lambda$  为氦氖激光波长  $632.8\text{nm}$ ， $x_1$  为  $K=1$  时探头窗口由主极大移动到第一个极小时的距离。 $D$  为单缝到探头窗口的距离。

测量单缝缝宽实验记录：

单位：mm

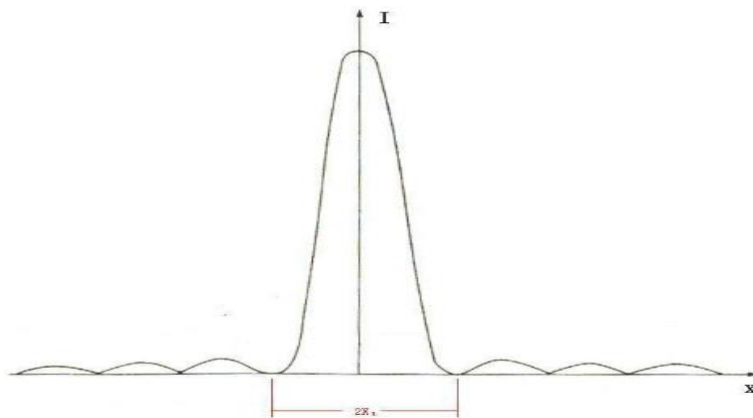
|                  |  |                                       |  |
|------------------|--|---------------------------------------|--|
| 衍射光波波长 $\lambda$ |  | 缝宽 $a$ 长度 $a = \frac{\lambda D}{x_1}$ |  |
| $K=1$ 时 $x_1$ 的值 |  |                                       |  |
| 狭缝到屏间距 $D$       |  |                                       |  |

**说明：**在本实验中，我们以探头作为光的接收器，以光电流的大小来反映光强。因此，必须测定光电流与光强之间的关系，只有在他们二者有线性关系的条件下，才能直接地以光电流的相对大小来表示光的相对强度。测定这一关系的一个简单方法是利用点光源，这是基于已知：在点光源的光场中某一点的光强和该点到点光源的距离  $r$  的平方成正比。因此，可以通过改变光电池与点光源的距离  $r$  来定量地改变光强。对于不同的  $r$  读出相应的光电流  $I$ ，可以做出  $I \sim 1/r^2$  图线，从而测定光电池的线性。实验室可以用短灯丝在白炽灯作光源，在距离  $r$  不太小时灯丝就可看作点光源。也可让光电流  $I$  通过一电阻  $R$ ，产生一电压  $V=IR$ ，而确定  $V$  与  $1/r^2$  的线性关系。

在实际试验中，优势可以直接应用探头的光电流与入射光强成线性关系的结论。

## 五、实验数据处理

1. 做出单缝衍射的光强分布曲线。在直角坐标系纸上，以横轴表示位置  $x$ ；纵轴表示光强度  $I$ 。由实验数据描出各点，用平滑曲线连接起来，即为单缝衍射的光强分布曲线。
2. 从光强分布曲线量出中央明纹的半宽度  $X_1$ 。代入公式  $a = \lambda D / X_1$  计算单缝的宽度。



## 六、思考题

1. 夫琅和费单缝衍射的光强分布公式是怎样的，衍射条纹分布规律如何？可调狭缝的宽窄、方位和观察屏的远近对衍射图样有何影响？

2. 在单缝衍射实验中，将主极强和次极强的光强比的实测值和理论值进行比较，分析产生偏差的原因。

3. 双缝干涉和衍射之间的关系如何。

## 七、视野拓展

菲涅尔衍射与夫琅禾费衍射

**菲涅耳衍射**指的是光波在近场区域的衍射，即光源或衍射的图样的屏与衍射孔(障碍物)的距离是有限的。菲涅耳衍射积分式可以用来计算光波在近场区域的传播，因法国物理学者奥古斯丁·菲涅耳而命名，是基尔霍夫衍射公式的近似。