

衍射实验

实验注意事项

1. 实验中任何时候都不要眼睛直视激光!!!
2. 实验中如需插拔电源，注意用电安全。
3. 不要用手触及光学元件（CCD 镜头，衰减片，衍射元件）的表面，避免污损。
4. 讲课结束前禁止打开、调节实验仪器。
5. 实验中请爱护实验设备，轻拿轻放，注意人身安全及实验仪器安全。
6. 测量条纹位置时沿单方向转动千分头，避免回程误差/空程误差。
7. 如实记录实验数据，**编造/篡改实验数据一经发现判零分。**
8. 实验数据经指导老师签字，整理好实验设备后方可离开。

实验报告要求

1. 实验报告应包含（自己归纳整理的）实验原理，实验方法，实验现象记录，相应的数据处理，误差分析，实验总结等，需完成思考题。
2. 推荐用软件作图（打印），也可在坐标纸上手绘（使用铅笔作图）。实验报告可手写或交纸质打印件，不收电子版文件。
3. **实验报告如发现雷同，抄袭者和被抄袭者均判零分。**

衍射实验

波在传播方向上遇到障碍物时，能够偏离直线传播而绕过障碍物的边缘前进，这种物理现象称为衍射（diffraction）。光的衍射效应最早由弗朗西斯科·格里马第（Francesco Grimaldi）于1665 年发现并加以描述，他也是“衍射”一词的创始人。惠更斯和菲涅尔认为光具有波的属性，其空间传输过程表现为同一波阵面上各点发出的子波在空间传播时的相互作用，空间各点光的强度，由各子波在该点的相干叠加所决定。这就是惠更斯—菲涅尔原理，有效的解释了光的衍射现象，是近代物理光学的理论基础。

光的衍射现象是近代光学技术的实验基础，研究光的衍射现象，有助于理解光的波动性特征，加深对光的本质的认识。

实验目的

- 1. 对光学实验形成感性的认知，掌握组装、调整衍射实验光路的方法；
- 2. 使用不同结构衍射屏实现夫琅禾费衍射，观察实验现象，研究不同结构衍射屏的衍射光强分布特征；
- 3. 结合理论计算衍射屏的结构参数，包括单缝的缝宽，双缝中心间距以及小孔的直径。

实验原理

根据光源—障碍物—接收屏距离的不同，衍射现象可分为夫琅禾费衍射和菲涅尔衍射两种，本实验仅研究夫琅禾费衍射。

当光源和接收屏都距离衍射屏无限远（或相当于无限远）时，在接收屏处由光源及衍射屏产生的衍射为夫琅禾费衍射，此时，入射光和衍射光都是平行光。它的衍射图样比较简单，便于用菲涅耳半波带法计算各级加强和减弱的位置。

1. 产生夫琅禾费衍射的光路

标准的夫琅禾费衍射实验光路如下图所示，其中光源 S 和接收屏 P 分别位于透镜 L1 和 L2 的焦平面上，用于实现光源和接收屏到衍射屏的距离无限远效果。

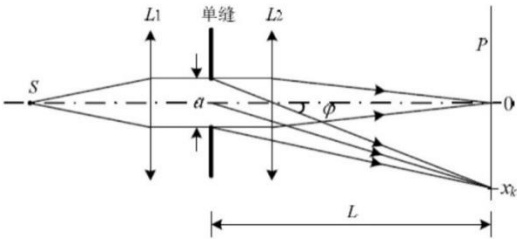


图 1 单缝夫琅禾费衍射光路

S 为波长为 λ 的单色光源，在 L_1 和 L_2 之间插入一个缝宽为 a 的狭缝后，可以在屏 P 上观察到亮暗交替按一定规律分布的衍射图样，其图样特点和狭缝缝宽以及光的波长 λ 相关。

为简化光路，本实验使用 He-Ne 激光器作为光源，利用激光优异的方向性省去准直透镜 L_1 ；同时使观察屏远离狭缝，由于狭缝的宽度远小于缝到屏的距离，省略透镜 L_2 。简化后的光路图如图 2 所示。

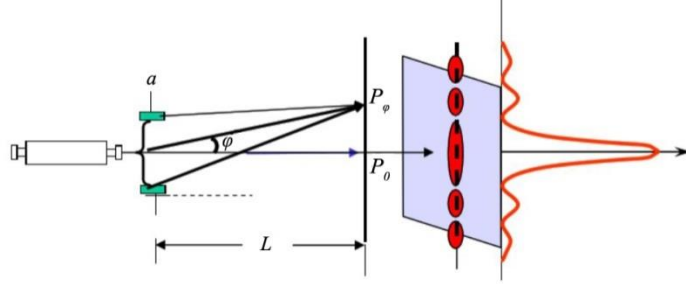


图 2 简化单缝夫琅禾费衍射光路图

2. 单缝夫琅禾费衍射的光强分布

从光源发出的平行光束垂直照射到狭缝上时，在后焦面（或无限远的屏）会形成一组明暗相间的条纹，这就是单缝夫琅禾费衍射现象。

依据惠更斯—菲涅尔原理，狭缝上各点都可以看成是发射子波的新波源，子波在后焦面（或无限远的屏）上叠加，其光强分布可计算为：

$$I_{\varphi} = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2, \quad u = \pi a \frac{\sin \varphi}{\lambda} \quad (1)$$

式中 a 为单缝的宽度， I_0 为入射光光强， φ 为衍射光与光轴的夹角——衍射角。在衍射角为 φ 时，观察点的光强值 I_{φ} 与光波波长 λ 和单缝宽度 a 相关。 $\left(\frac{\sin u}{u} \right)^2$ 常称为单缝衍射因子，表征衍射光场内任一点相对光强 $\frac{I_{\varphi}}{I_0}$ 的大小。若以 $\sin \varphi$ 为横坐标， $\frac{I_{\varphi}}{I_0}$ 为纵坐标，可以得到单缝衍射光强的分布谱图，如图 3 所示。

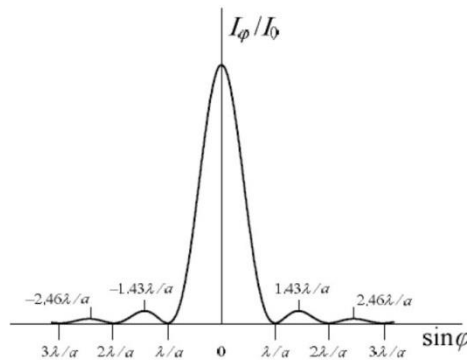


图 3 单缝衍射相对光强分布曲线

当 $u = 0$ 即 $\varphi = 0$ 时,

$$I_{\varphi} = I_0 \quad (2)$$

这时平行于光轴的光线会聚处, 中央亮条纹中心点的光强, 是衍射图像中光强的极大值, 称为中央主极大。当

$$a \sin \varphi = k\lambda, \quad k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \dots \quad (3)$$

则 $u = k\pi$ ($k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \dots$)时, $I_{\varphi} = 0$, 即为暗条纹。与此衍射角对应的位置为暗条纹的中心。由于 φ 很小, $\sin \varphi = \varphi$, (3)式可改写为

$$\varphi = \frac{k\lambda}{a} \quad (4)$$

由图 1 可知, k 级暗条纹对应的衍射角

$$\varphi_k = \frac{x_k}{L} \quad (5), \quad x_k \text{ 为第 } k \text{ 级暗条纹距离中央亮条纹中心的距离。}$$

故

$$\frac{k\lambda}{a} = \frac{x_k}{L} \quad (6)$$

由以上讨论可知

- (1) 中央亮条纹的宽度被 $k = \pm 1$ 的两暗条纹的衍射角所确定, 即中央亮纹的角宽度为 $\Delta\varphi = \frac{2\lambda}{a}$ 。
- (2) 衍射角 φ 与缝宽 a 成反比, 缝加宽时, 衍射角减小, 各级条纹向中央收缩; 当缝宽 a 足够大时 ($a \gg \lambda$), 衍射现象就不显著, 以致可略去不计, 从而可将光看成是沿直线传播的。
- (3) 对应任意两相邻暗条纹, 其衍射光线的夹角为 $\Delta\varphi = \frac{\lambda}{a}$, 即暗条纹是以点 P_0 为中心, 等间隔、左右对称分布的。
- (4) 位于两相邻暗条纹之间的是各级亮条纹, 它们的宽度是中央亮条纹宽度的 $1/2$, 这些亮条纹的光强最大值称为次级大。用衍射角表示这些次级大的位置分别为

$$\varphi = \pm 1.43 \frac{\lambda}{a}, \pm 2.46 \frac{\lambda}{a}, \pm 3.47 \frac{\lambda}{a}, \dots \dots \quad (7)$$

与它们相应的相对光强分别为

$$\frac{I}{I_0} = 0.047, 0.017, 0.008, \dots \dots \quad (8)$$

3. 双缝夫琅禾费衍射的光强分布

将图 1、2 中的单缝换成双缝，每条狭缝的宽度仍为 a ，中间不透光部分宽度为 b ，则双缝中心间距 $d = a + b$ 。双缝衍射光路图如图 4 所示。

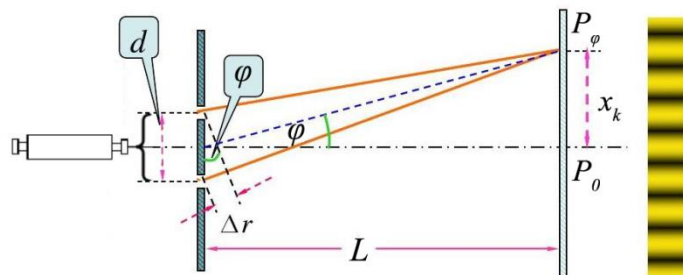


图 4 双缝衍射光路图

$$\text{屏上 } P_\varphi \text{ 处的光强分布为: } I_\varphi = 4I_0 \frac{\sin^2 u}{u^2} \cos^2 v \quad (9)$$

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

式(9)表明，双缝衍射图样的光强分布由两个因子决定：其一为 $\frac{\sin^2 u}{u^2}$ ，即单缝夫琅禾费衍射图样的光强分布；其二为 $4I_0 \cos^2 v$ ，表示光强同为 I_0 而相位差 $2v$ 的两束光所产生的干涉图样的光强分布。因此双缝夫琅禾费衍射图样是单缝衍射和双缝干涉这两个因素联合作用的结果。

由式(9)可以得出：

(1) 这两个因子中有一个为零，则光强为零。

$$\text{就第一个因子 } \frac{\sin^2 u}{u^2} \text{ 而言，光强为零的条件是： } u = \pi a \frac{\sin \varphi}{\lambda} = k\pi, \text{ 即 } a \sin \varphi = k\lambda \quad (k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (10)$$

$$\text{就第二个因子 } 4I_0 \cos^2 v \text{ 而言，光强为零的条件是： } v = \pi d \frac{\sin \varphi}{\lambda} = \pm \left(m - \frac{1}{2}\right)\pi, \text{ 即}$$

$$d \sin \varphi = \pm \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (11)$$

(2) 出现双缝干涉光强极大值的条件是：

$$v = \pi d \frac{\sin \varphi}{\lambda} = n\pi, \text{ 即 } d \sin \varphi = n\lambda \quad (n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$$

(3) 当 $d \sin \varphi = n\lambda$ 确定的干涉极大正好与由 $a \sin \varphi = k\lambda$ 确定的衍射极小的位置重合时，那么第 n 级干涉极大将不会出现，称为缺级。即当 $\frac{n}{k} = \frac{d}{a}$ 时发生缺级。

当入射狭缝的宽度远小于入射光的波长时，在观察屏上可以看到辐照度近似相等的干涉条纹。条纹宽度可用公式 $x_k = \frac{L}{d} \lambda$ 表示，其中 x_k 表示双缝衍射条纹的间距， L 为屏到双缝的距离，

λ 为单色光的波长。条纹间距 x_k 与屏到双缝的距离 L 成正比，与双缝中心间距 d 成反比。在双缝衍射中，当入射波长一定时，双缝中心间距越小，衍射现象越明显，条纹越宽。

实际的实验中缝的宽度不可忽略，则观察到的条纹辐照度并不相等。呈现在观察屏上的亮条纹中央最亮，两侧亮度逐渐衰减。因此，实际产生的图样是干涉、衍射效应的总和。简单地说，实际双缝实验的条纹，具有理想双缝干涉中条纹的位置，但是辐照度在观察屏上的分布类似单缝衍射中央强、两侧弱的情况，如图 5 所示。实际的双缝干涉是干涉和衍射的共同效应。

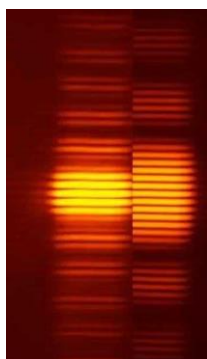


图 5 实际双缝衍射的光强分布

4. 圆孔夫琅禾费衍射的光强分布

由于光的波动性，光通过小孔会发生衍射，产生明暗相间的条纹衍射图样，条纹间距随小孔尺寸的减少而变大。大约有 84% 的光能量集中在中央亮斑，其余 16% 的光能量分布在各级明环上。衍射图样的中心区域有最大的亮斑，称为艾里（Airy）斑。如图 6 所示。艾里斑的角度与波长 λ 及小孔的直径 D 满足关系： $\sin \theta = 1.22\lambda/D$

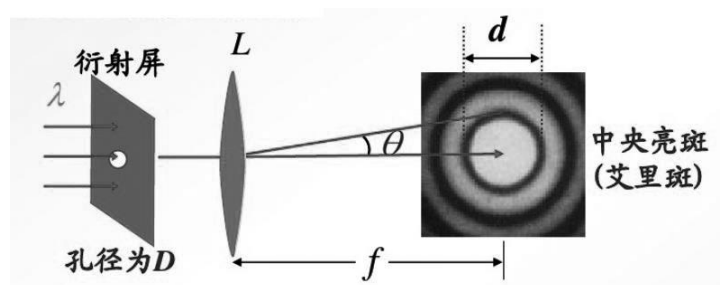


图 6 圆孔夫琅禾费衍射

θ 即第一暗环的衍射方向角（即从中央亮斑的中心到第一暗环对透镜光心的张角），因为 θ 角一般都很小，有 $\sin \theta \approx \theta$ ，故 $\theta \approx 1.22\lambda/D$ 。

对于光学成像系统而言，用艾里斑直径衡量成像面分辨率的极限，艾里斑半径为 $r = 1.22\lambda f/D$ 。

实验仪器

光学导轨及附件，He-Ne 激光器（632.8 nm）及电源，衰减片，衍射元件（单缝，双缝，圆孔等），CCD，一维平移台，显示屏，支架等。

实验内容

一、基础实验

- 1、观察单缝、双缝和小孔的衍射光强分布，总结各元件衍射图样的特点；
- 2、观察并总结单缝、双缝和小孔缝宽（或直径）变化时衍射图样的变化规律。

二、提升实验

- 1、记录单缝衍射各级暗条纹和中央主极大位置，计算单缝缝宽 a ，求相对误差；
- 2、记录双缝衍射各级亮条纹（或暗条纹）位置，计算双缝中心间距 d （ $d=a+b$ ，为光栅常数，即其空间周期， a 为缝宽， b 为不透光部分的宽度），求相对误差。

三、进阶实验

- 1、观察、分析不同形状的小孔，不同 d 值的光栅，以及细丝等元件的衍射图样。
- 2、利用手机屏幕，使用衍射的方法测量激光波长。设计、完成实验。

四、高阶实验

- 1、利用光的衍射测量弹簧的参数。
- 2、由任意衍射图样，求解其对应的衍射屏，给出具体的实验方案或思路。

思考题

1. 当光通过一个小孔时，在后面的光屏上会得到什么样的图案？
2. 白光照射到狭缝上，衍射条纹有什么特点？
3. LED 射灯照到手机屏幕时可观察到下图中的现象，解释其原因。

