

# 光信息处理

物理学院 2400011527 侯佳奇

2025 年 3 月 10 日

## 1 实验仪器调节

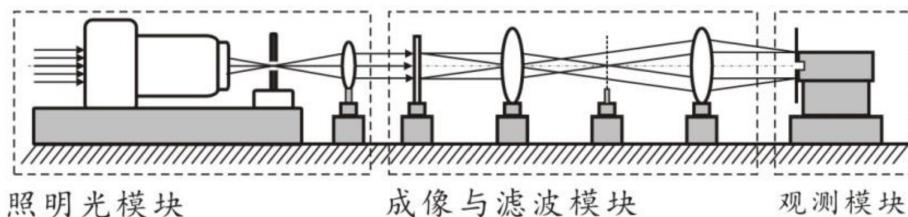


图 1: 实验仪器

实验仪器调节如图,实验中使用二维光学试验台,为了提高准确性,使用两个反射镜延长光路,注意调整扩束透镜和凸透镜之间的距离,使得出射光为平行光,既不发散,也不会聚。

同时要调节图样和第一个凸透镜之间距离250mm,两个透镜距离500mm,CCD照相机距离第二个透镜250mm(透镜焦距为250mm),此时两透镜之间的中点就是频谱面的位置,将一个光屏放置在此处,前后移动找到衍射光点最清晰的位置就是频谱面。

第一个透镜作用是对物体衍射的各种不同频率的光进行傅里叶变换,第二个透镜是以频谱面上的衍射图样为物体,进行傅里叶变换的逆变换从而实现成像。

观察像图可以直接调整CCD相机位于第二个透镜的后方25cm处,观察到物体的像;观察频谱图有两种方法,一是将CCD相机移到频谱面的位置,二是在CCD相机的前端放置一个凸透镜(焦距约为6cm),调整距离即可观察到清晰的频谱面图样。

## 2 实验现象记录

### 2.1 观察小孔阵列的空间频谱和像的分布

小孔阵列的频谱分布特征:阵列整体频谱的特征和单个小孔的衍射分布类似,而单体细节处与二维光栅的衍射分布类似,即小孔阵列的频谱分布是单元小孔的频谱分布与二维周期结构的频谱分布的乘积排布。

现象解释：这是因为小孔阵列的周期结构可以由小孔和二维周期结构的透过率函数卷积得到，而根据卷积定理，原函数的卷积经过傅里叶变换之后表现为像函数的乘积。

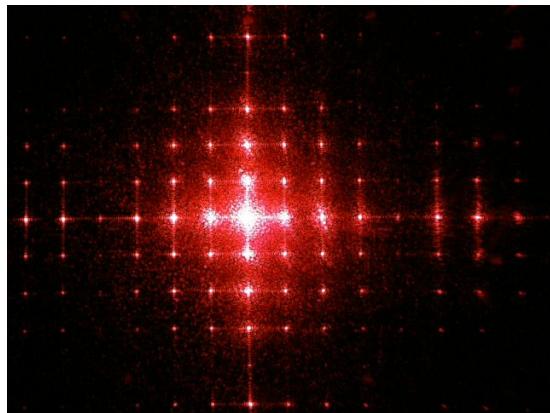


图 2: 方孔方阵频谱图

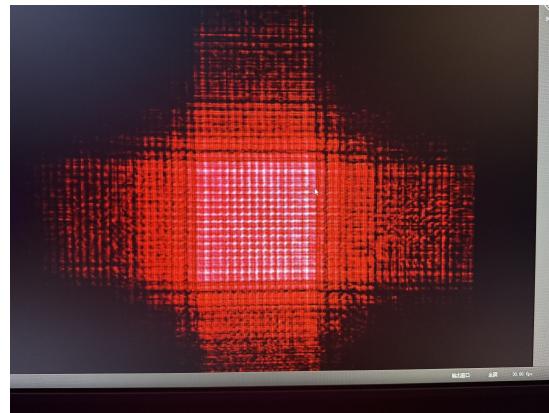


图 3: 方孔方阵像图

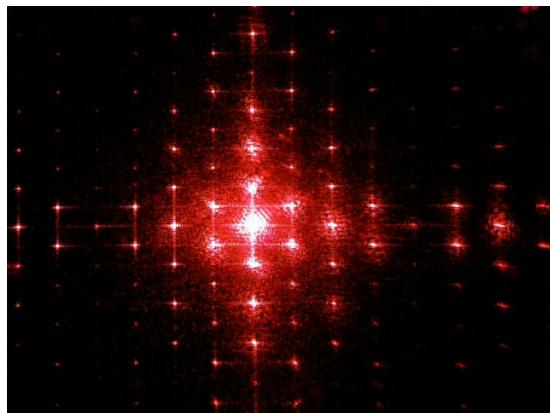


图 4: 方孔密排频谱图

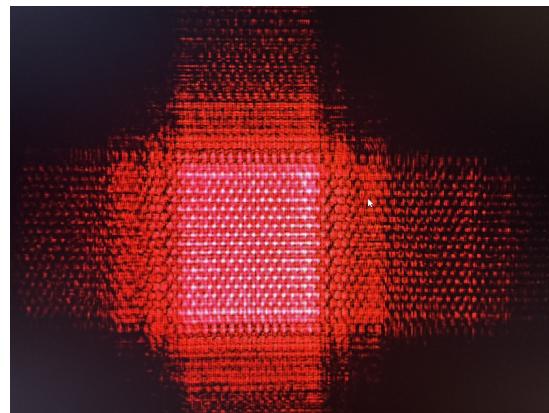


图 5: 方孔密排像图

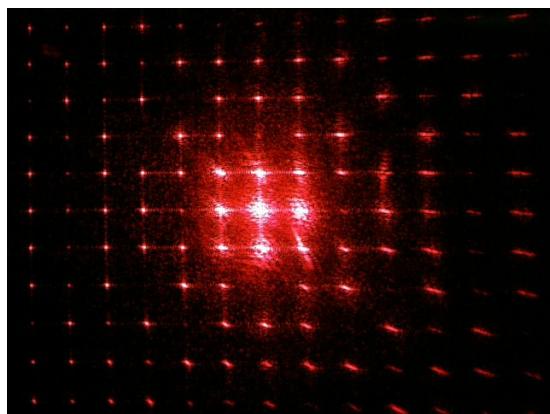


图 6: 圆孔方阵频谱图

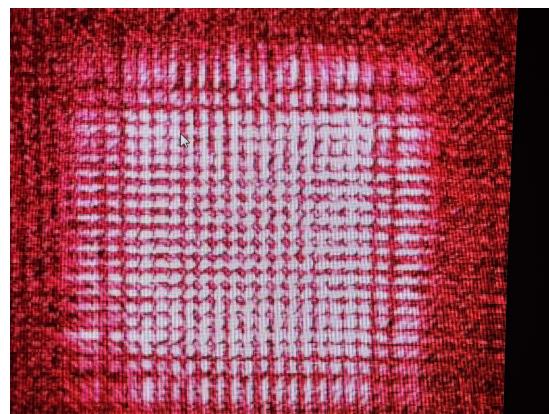


图 7: 圆孔方阵像图

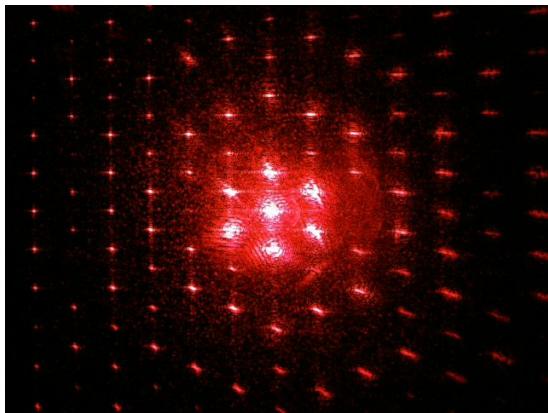


图 8: 圆孔密排频谱图

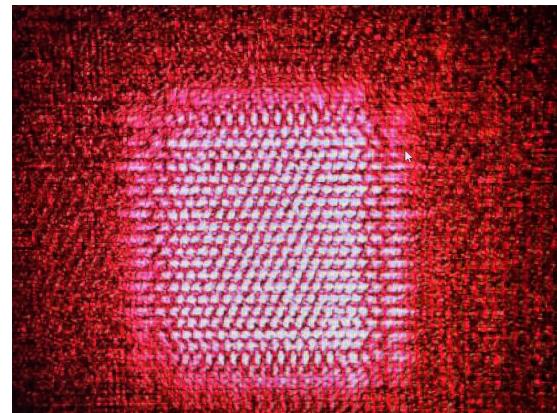


图 9: 圆孔密排像图

## 2.2 一维光栅

### 2.2.1 一维光栅的频谱图像图

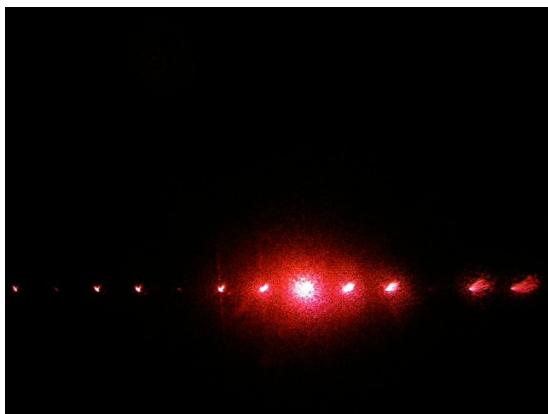


图 10: 一维光栅频谱图

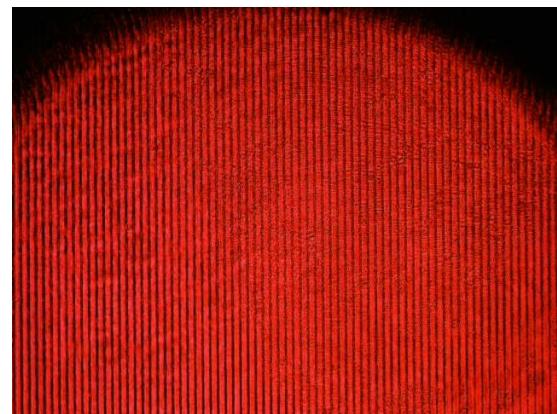


图 11: 一维光栅像图

### 2.2.2 一维光栅的频谱图、像图分析

这里观察到一维光栅的衍射频谱面类似双缝干涉的图样，但是仔细观察图10会发现各个亮斑的量的差别较大，其中三级衍射的亮斑几乎看不见，这可以用一维光栅的理论进行解释：

(1) 单缝衍射因子：

对于一个宽度为a的单缝，根据惠更斯-斯涅尔原理，单缝衍射在某一衍射角 $\theta$ 处的光强分布为：

$$I_1 = I_{01} \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2$$
$$\beta = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}$$

$\lambda$  是光的波长,  $I_{01}$  是单缝中心的光强

(2) 多缝干涉因子:

假设光栅有  $N$  条狭缝, 相邻狭缝之间的距离是  $d$  (光栅常数), 各个狭缝在衍射角  $\theta$  处的光程差  $\Delta = dsin\theta$ , 对应的相位差  $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} dsin\theta$

多缝干涉在衍射角处的光强分布是:

$$I_2 = I_{02} \left( \frac{\sin \frac{N\delta}{2}}{\sin \frac{\delta}{2}} \right)^2$$

其中  $I_{02}$  是多缝干涉在中心处的光强

(3) 光栅衍射强度分布:

一维光栅衍射的光强分布是单缝衍射和多缝干涉共同作用的结果, 即:

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \left( \frac{\sin \frac{N\delta}{2}}{\sin \frac{\delta}{2}} \right)^2$$

其中  $I_0$  是入射光强

所以频谱面上观察到的衍射斑点亮暗不均, 我们所用的光栅为第三次极大几乎看不见。

通过测量, 发现频谱面上第一主极大距离第二极大的距离  $x = 2.0mm$ ,  $e_l = 0.1mm$  根据书上公式 (35.3), 可以算得光栅常数:

$$F = 250mm, \lambda = 632.8nm$$

$$x = \frac{F\lambda}{d}, d = \frac{F\lambda}{x} = 7.91 \times 10^{-5}m = 0.791mm$$

$$f_x = \frac{1}{d} = 12.6mm^{-1}$$

下面是我使用mathematica绘制的一维光栅衍射图样的示意图

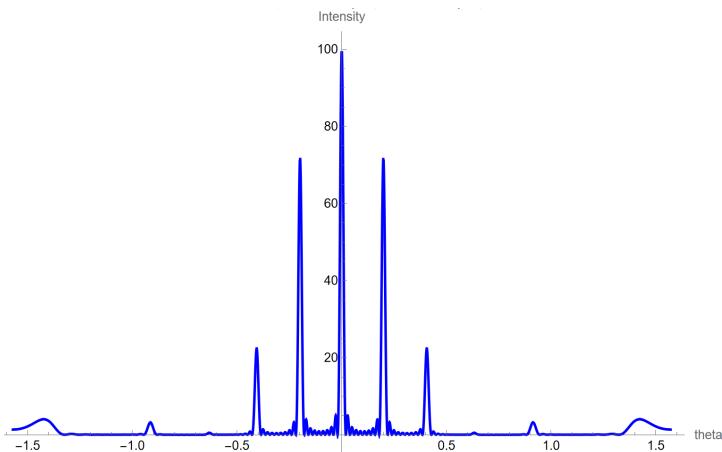


图 12: 一维光栅衍射光强分布

### 2.2.3 一维光栅的空间滤波



图 13: 一维光栅滤去0级的像图



图 14: 一维光栅像图滤去1级的像图

观察图样发现滤去0级主极大之后整体图样仍然呈现竖直的衍射条纹，但是和图11相比，条纹中间的亮斑几乎消失，这是因为0级主极大的光强远远大于其他级别的光强，所以滤去0级主极大之后整体的光强减弱，条纹相间部分变“黑”。

只保留0级之后，条纹消失，只剩下红色的背景，这是因为0级不含任何物体的信息，



图 15: 一维光栅只保留0级衍射的像图



图 16: 一维光栅只保留1级衍射的像图



图 17: 一维光栅只保留2级衍射的像图

只有背景光强。

只保留1级之后，整体的光强减弱，条纹相间部分变“黑”。

只保留2级之后，整体的光强再减弱，条纹相间部分再变“黑”。

## 2.3 二维光栅

### 2.3.1 二维光栅的频谱图像图

二维光栅的频谱图整体呈现类似一维光栅频谱图的二维化，类似地，仔细观察发现2、3、4级衍射的亮斑几乎看不见，并且不同位置的光强并不是相同的，这和一维光栅的原理是一样的，即狭缝衍射和多缝干涉叠加的结果。只是在二维光栅中，我们需要考虑两个方向上的衍射因子，所以在频谱图上会出现更多的亮斑。

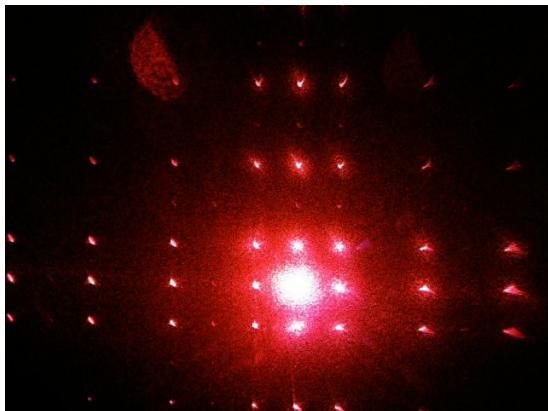


图 18: 二维光栅频谱图



图 19: 二维光栅像图

### 2.3.2 不同狭缝光阑进行空间滤波



图 20: 横向光阑



图 21: 45度斜向光阑



图 22: 竖向光阑

这样的现象相当于是通过狭缝将二维的光栅衍射频谱改变成一位光栅的衍射频谱，并且条纹延伸方向和光阑狭缝方向垂直。

同时仔细观察发现横向、竖向的条纹间距比45度斜向光阑的条纹间距要大，这是因为45度斜向光阑滤波时，频谱面上衍射斑点间距刚好是正方形对角线，即横向（竖向）的 $\sqrt{2}$ 倍，这样再次衍射之后条纹间距变小。

## 2.4 “光”字的光学衍射

### 2.4.1 “光” 的频谱图像图

由于光字空间频率较低，所以在频谱图上集中在原点附近，很难观察到，频谱图整体类似二维光栅的频谱图 如图26，直径 1mm 的小孔滤波，过滤了高频成分，保留了低频成分。画面中可以看到光字，而看不到光栅细节成分，光字的边缘变得模糊。

如图27,小孔太小，导致信息丢失严重，失去了“光”字的信息，只剩下模糊的光影。如图28滤去中间直流分量之后，光字的整体亮度降低，但是光字的轮廓清晰，边缘锐利。如图29只保留一级衍射之后，光字的整体亮度降低，并且轮廓也不清晰，边缘模糊。

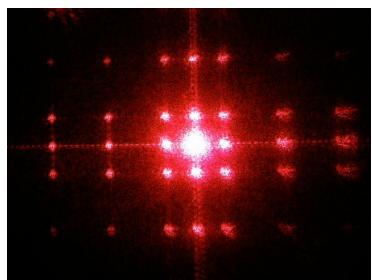


图 23: “光”的频谱图

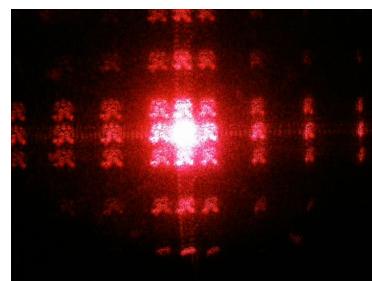


图 24: “光”的频谱图(偏  
离频谱面一定距离)

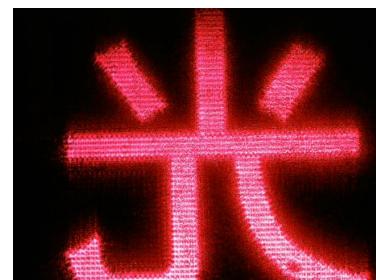


图 25: “光”的像图

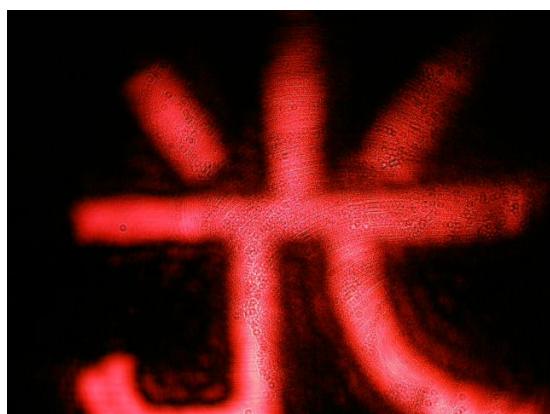


图 26: 1mm狭缝



图 27: 0.3mm狭缝

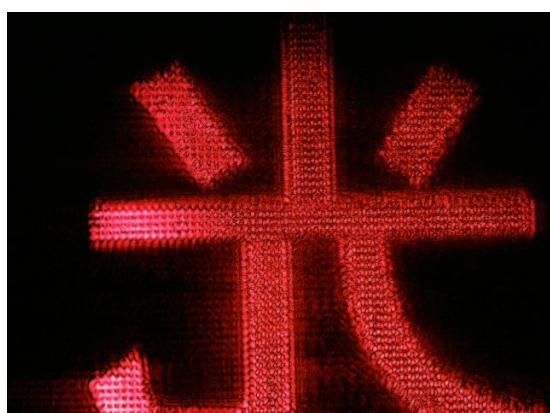


图 28: 只滤去0级衍射



图 29: 只保留一级衍射

## 2.5 “十”字的光学衍射

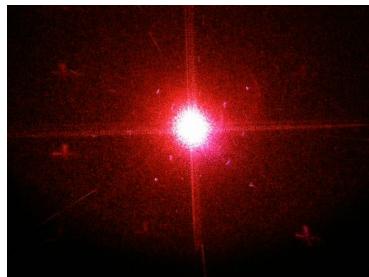


图 30: “十”的频谱图



图 31: “十”的像图

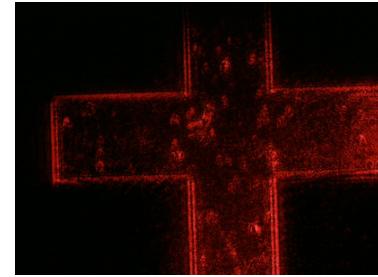


图 32: “十”滤去主极大

解释: 图32显示的是“十”字滤去主极大之后的图像, 由于滤去中央低频区域的光强, 所以整体的亮度降低, 原本红色亮的部分变暗, 但是“十”字的轮廓清晰, 边缘锐利。

## 2.6 观察正交的不同光栅的卷积定理

### 2.6.1 叠加衍射图样

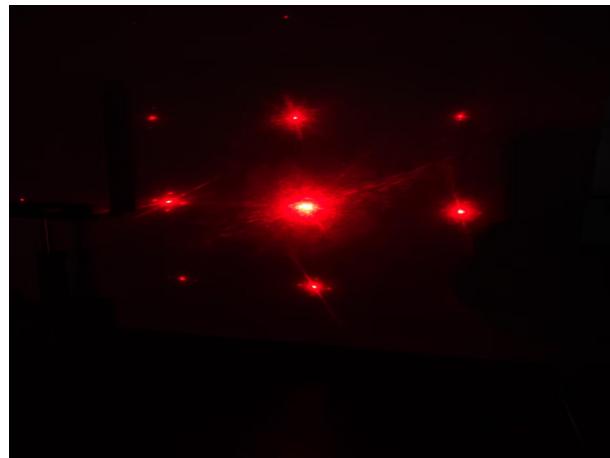


图 33: 不同光栅叠加的图样

解释: 图中可以观察到两个光栅的衍射图样叠加在了一起, 类似于在200线/mm的光栅的衍射图样的亮斑附近, 再叠加上20线/mm的光栅的衍射图样。

## 2.6.2 卷积定理的理论分析

已知卷积定理: 
$$\begin{cases} \mathcal{F}(f(x, y) \otimes g(x, y)) = \mathcal{F}(f(x, y)) \cdot \mathcal{F}(g(x, y)) \\ \mathcal{F}(f(x, y) \cdot g(x, y)) = \mathcal{F}(f(x, y)) \otimes \mathcal{F}(g(x, y)) \end{cases}$$

假设两个光栅的透过率函数分别是  $t_1(x, y) t_2(x, y)$

$$t_1(x, y) = \sum \delta\left(\frac{x}{d_1} - n\right) \sum \delta\left(\frac{y}{d_1} - n\right)$$

$$t_2(x, y) = \sum \delta\left(\frac{x}{d_2} - n\right) \sum \delta\left(\frac{y}{d_2} - n\right)$$

$$T = t_1 \cdot t_2$$

$$\mathcal{F}(T) = \mathcal{F}(t_1) \otimes \mathcal{F}(t_2)$$

$$\mathcal{F}(t_1) = \frac{1}{d_1^2} \sum \delta(d_1 f_x - n) \sum \delta(d_1 f_y - n)$$

$$\mathcal{F}(t_2) = \frac{1}{d_2^2} \sum \delta(d_2 f_x - n) \sum \delta(d_2 f_y - n)$$

$$\mathcal{F}(T) = \frac{1}{d_1^2 d_2^2} \sum_{m,n,p,q} \delta\left(f_x - \frac{m}{d_1} - \frac{p}{d_2}\right) \delta\left(f_y - \frac{n}{d_1} - \frac{q}{d_2}\right)$$

$d_2 = N d_1$  时 (N 为整数), 次光栅的频率间隔为  $\frac{1}{N d_1}$ , 主光栅点阵的每个点  $\left(\frac{m}{d_1}, \frac{n}{d_1}\right)$  周围有  $N \times N$  个

## 2.7 $\theta$ 调制

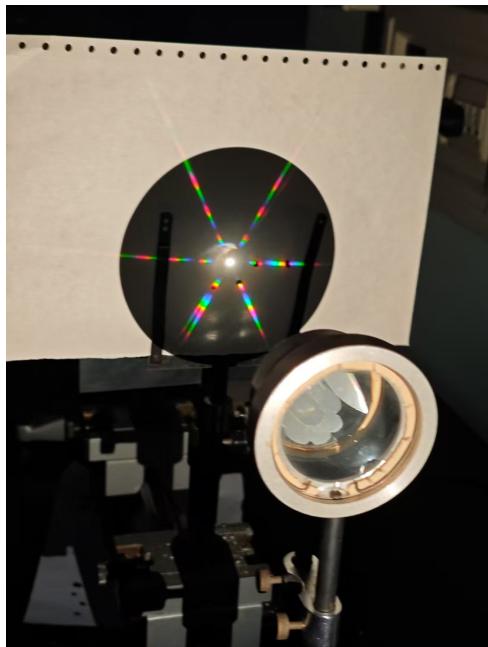


图 34: 不同取向的光栅叠加的图样



图 35:  $\theta$  调制

理论分析:小花图样分别由三个夹角120度的光栅叠加而成,当一束光照向三个光栅时,三个衍射光栅的衍射图样交错开并且由于白光时复色光,所以在图样中可以看到不同颜色的光斑,这是由于不同波长的光在光栅上的衍射角度不同,所以在图样中可以看到不同颜色的光斑。

此时拿点燃的香将想要的颜色所在的位置的纸烧破,就可以得到相应的小花想要的颜色的光斑。

### 3 分析与反思

本次光信息实验是本学期第一个实验并且是双周实验,第一次实验课时搭建光路就花费了很多时间,并且由于理论知识的不足在理解光路的相关原理方面遇到一些问题,比如在调整光路时,共线的调整总是不如人意。

但是第二节课的时候,我能很明显感觉到自己的熟练度在增加,但是最后还是碰到了一些问题:部分图样的拍摄不够完美,如等边三角形,等腰三角形五角星等等。

通过这次实验,我对阿贝成像原理,空间滤波,光栅衍射等知识有了更深的理解,并且在实验中也学会了如何调整光路,如何拍摄图样等技能。并且对傅里叶变换,卷积定理等等数学知识有了一个初步的了解,以及对图像的认识。

同时,本次实验许多细节没有做到很好,比如测量一维光栅的频谱面衍射斑点间距时,直接使用钢尺进行测量,这样的误差极大,后来我从其他地方了解到可以使用CCD观测平行光束,分别用尺子测量光束的宽度和电脑上显示的像素宽度,通过这个可以计算出来放大的实际比例,然后观察相机拍摄出来的斑点间距,这种方法的精确度更高,但是我没有在实验中使用这种方法,这是我在实验中的一个失误。