

搭建衍射光谱仪

BrightMoon

August 22, 2024

1 设计思路

总体设计的示意图和实物图参见图2。

1.1 理论基础

利用光通过衍射光栅发生衍射，且不同波长的光衍射光斑位置不同的性质，把不同波长的光区分开。这里主要参考的是夫琅禾费衍射，相关光路图见图1(a)。

1.2 重要改进

1.2.1 使用纯粹夫琅禾费衍射潜在的问题

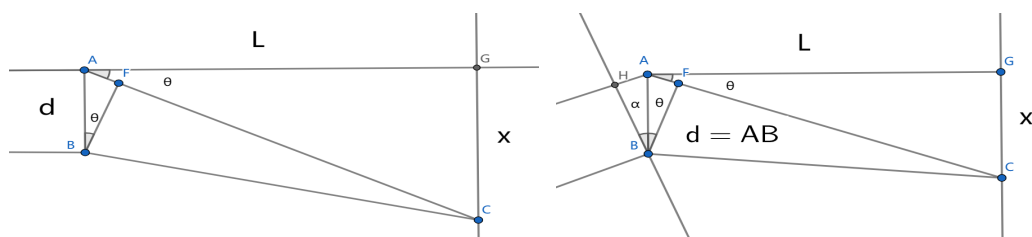
$$d \sin \theta = \lambda \quad (1)$$

$$\theta \approx \sin \theta = \frac{\lambda}{d} \approx \frac{700 \text{ nm}}{10^{-3} \text{ mm}} = 0.7 \text{ rad} = 40^\circ \quad (2)$$

夫琅禾费衍射要求入射光垂直于光栅与光屏，光栅与光屏平行放置。这样造成的结果就是，衍射光线以较大角度斜向打在光屏上。然而，我们知道，用摄像头充当光屏的最大问题在于，镜头存在视角 γ 。而我所使用的摄像头视角比较小 ($\gamma \approx 30^\circ$)，利用这种方法不能完全接收所有可见光波段的衍射光。

1.2.2 改进方案

于是，我想到，可以让入射光斜射光栅，这样，在通过衍射光栅之前，就已经产生了光程差，使得衍射光线接近于垂直的方式，小角度斜射光屏，从而可以被手机镜头完整接收到



(a) 夫琅禾费衍射光路图：入射光垂直于光栅 AB；衍射光大角度斜射光屏。
(b) 改进的衍射光路图：入射光斜射光栅；衍射光小角度斜射光屏。

Figure 1: 衍射光路图示意：其中 AB 代表光栅，GC 代表光屏； α 代表入射角， θ 代表衍射角。

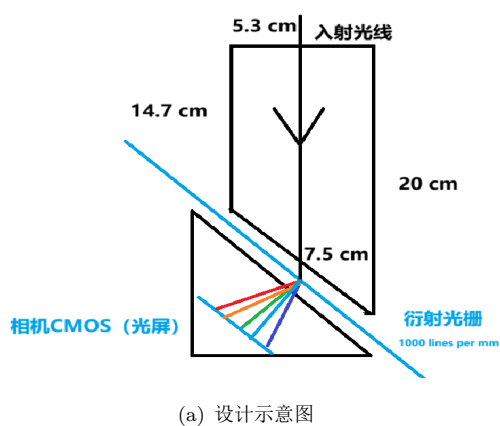


Figure 2: 我设计的衍射光谱仪

(图1(b))。

$$d \sin \alpha + d \sin \theta = \lambda, \quad \text{令 } \alpha \approx 45^\circ \quad (3)$$

$$|\theta| \approx |\sin \theta| = \left| \frac{\lambda}{d} - \sin \alpha \right| \approx \left| \frac{700 \text{ nm}}{10^{-3} \text{ mm}} - \frac{\sqrt{2}}{2} \right| = 4.5^\circ \quad (4)$$

并且这种方式下，不同波长的光的一级衍射明纹，在光屏上近似线性分布（ x 是 λ 的一次函数）。

$$x = L \tan \theta \approx L \sin \theta = L \left(\frac{\lambda}{d} - \sin \alpha \right)$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta \lambda} \approx \frac{L}{d}$$

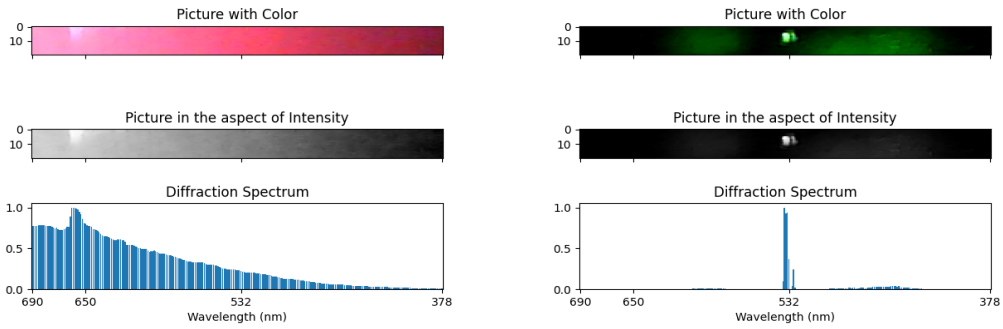
1.2.3 编写程序

在相机的 CMOS 上，光谱彩带只占很小一个区域，为了简明清晰，需要将这一区域截取而丢弃其它部分。对于这条光谱彩带，我需要分析各处的相对光强，这里需要图像处理，得到每一纵列像素的平均灰度值（表示光强）。然后需要把这一组数据可视化成柱状图。为了操作简便，我编写了一个 Python 程序，用来一次性实现下述功能：

1. 拍照并裁剪画面（裁剪区域作为一个重要参数，首次使用需要通过实验确定）。
2. 标定横轴（不同位置对应何种波长，首次使用需要在实验中用红绿激光校准）。
3. 计算相对光强（相对灰度值）并绘制相对光强对不同波长 λ （位置 x ）的柱状图。

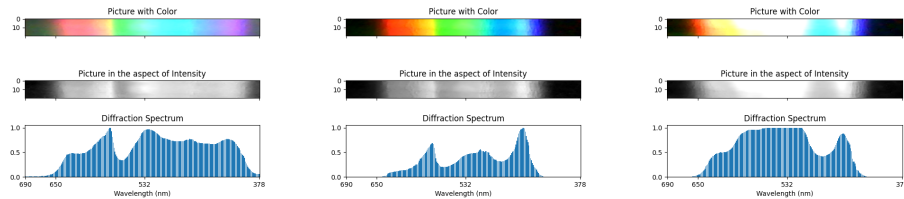
2 使用时的操作步骤

1. 确定裁剪区域，只保留包含色带的窄长条。（这是一劳永逸的测量，对于同一个机械装置，一旦确定，以后使用无需重复）
 - (a) 确定横向两端边界。本装置为 [350,620] 水平像素区间。
 - (b) 确定纵向两端边界。本装置为 [190,210] 垂直像素区间
 - (c) 输入程序，而后保持不变。
2. 标定基准波长，利用红绿两种激光。（在经过裁剪的画面中）（这是一劳永逸的测量，对于同一个机械装置，一旦确定，以后使用无需重复）



(a) 红色激光校准: 34.8 水平像素坐标对应 650nm 波长 (b) 绿色激光校准: 137 水平像素坐标对应 532nm 波长

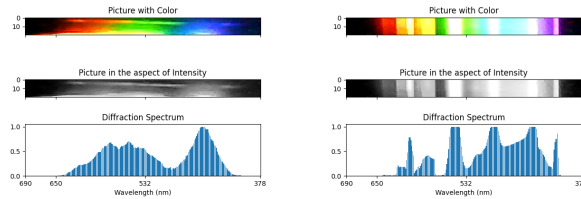
Figure 3: 激光校准过程



(a) 日光: 波段较宽而且连续

(b) 教室大灯

(c) 我的台灯



(d) 我的手机

(e) 宿舍荧光灯: 有明显的分立光谱

Figure 4: 日光与接近日光的光源

(a) 确定红色激光对应的横向坐标。本装置为 34.8 水平像素坐标, 对应 650nm 红色激光。参考图3(a)

(b) 确定绿色激光对应的横向坐标。本装置为 137 水平像素坐标, 对应 532nm 绿色激光。参考图3(b)

(c) 输入程序, 而后保持不变。

3. 再进行无数次测量。

(a) 不需要再调整任何参数, 只需要反复运行程序即可。

3 观测结果

我以图片的方式, 展示观测结果。日光以及接近日光的光源参见图4; LED 光源参加图5。

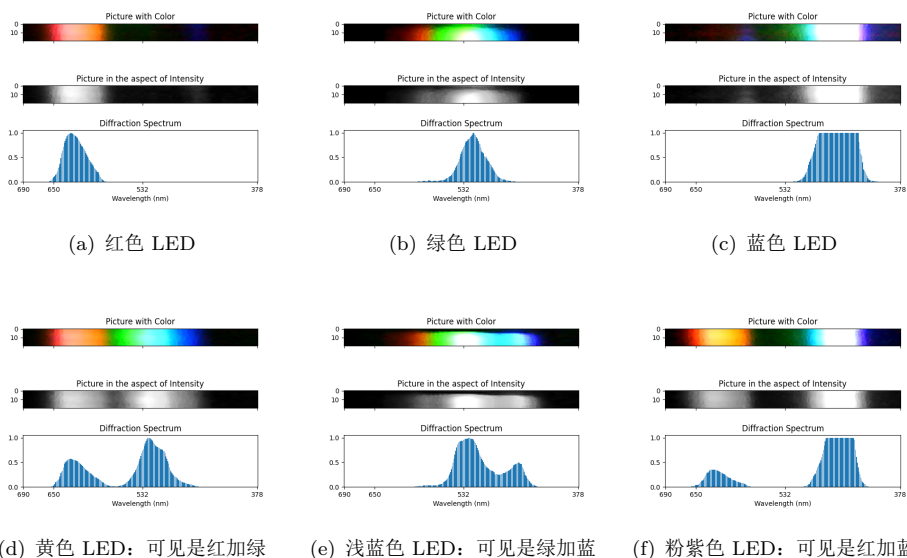


Figure 5: 不同颜色的 LED

4 效果评价

4.1 缺点

1. 在结果显示上，只能够给出相对光强（用照片的灰度计算得到），而不能给出光强的准确值。这主要是因为我不知道相机镜头的内部参数，灰度值与实际物理光强的定量换算关系。
2. 摄像机在 CMOS 质量不好，导致“噪音”较大。这一点在图3(a)中反映得尤为明显。红色激光，对应位置的周围有较大“噪音”。我试图用算法减小“噪音”的干扰，但仍然不能够去除。

4.2 优点

1. 改进了光路，克服了相机作为光屏，存在视角的问题。尽最大可能，接收各波段的衍射光。
2. 编写了程序：
 - (a) 把众多操作集成在一个 Python 文件中，使得操作上非常便捷，减少了重复劳动和后期处理的难度。
 - (b) 程序中，给裁剪画面和激光校准设置了可调节的参数，使得这个程序对于不同机械机构的光谱仪（比如其他同学制作的），可以采用同样的校准方法，迁移运用。
3. 将相机固定于光谱仪上，并用两束激光进行校准。固定的机械结构和激光校准，使得位置 x 可以和波长 λ 建立准确的对应关系，大大提高了测量精度。