



大学物理-基础实验 | 实验报告

姓名 卜一楠
学号 PB22071444
班级 22 级少院 01 班
日期 2023 年 9 月 18 日晚

基于彩色 CCD 的棱镜摄谱实验

1 实验目的

1. 学习复色光变成单色光的分光原件的原理和方法；
2. 理解摄谱仪的结构和原理，摄制 He、Hg、Na 的光谱，并且进行光谱分析。

2 实验原理

1. 棱镜摄谱仪

棱镜摄谱仪是利用棱镜作为分光元件的摄谱仪器，其分光原理如图 1 所示。棱镜摄谱仪的构造分为平行光管、棱镜、光谱接收三部分。

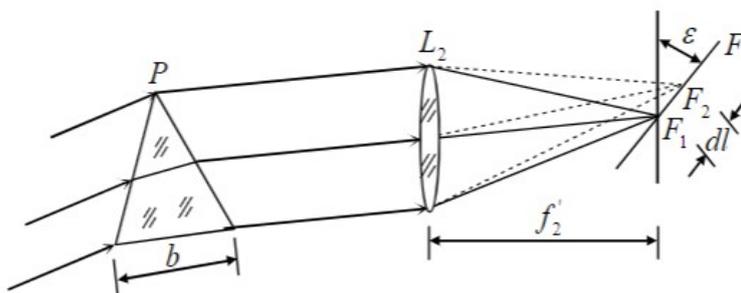


Figure 1: 三棱镜分光原理

本次实验所用的是可见光范围内的小型棱镜摄谱仪，如图 2 所示。S 为光源，L 为聚光透镜，使 S 发出的发散光会聚后均匀照亮狭缝， S_1 为狭缝，以控制入射光的宽度； L_1

为准直透镜，和 S_1 的距离大小等于其焦距，产生平行光后，均匀的照射在阿贝棱镜的入射面上。

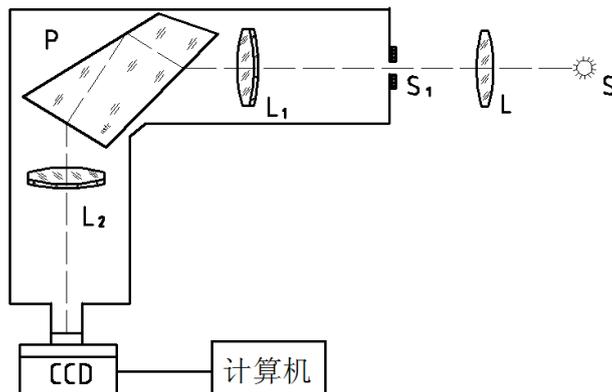


Figure 2: 棱镜摄谱仪原理简图

经透镜 L_1 照射过来的平行光，通过阿贝棱镜中的两个 30 度三棱镜分光，并作 90 度转向后出射，经阿贝棱镜分光后的各种单色光不再相互平行，而是之间有相互较小的夹角。经过分光后的各种单色光，由会聚透镜 L_2 ，将各种分离的单色光会聚成单一谱线，成像于 L_2 的谱平面上。将彩色 CCD 的成像面置于 L_2 的谱平面上；通过彩色 CCD 连接到计算机和显示器，可以看到各种分离的彩色谱线。

2. 光谱分析原理

用 CCD 拍摄不同的光源谱线，记录成图片格式存储。实验中，氦灯谱作为已知谱，氢灯谱和汞灯谱作为未知谱。在实验条件都相同的情况下，我们分别将三种光源谱分段拍摄下来，记录成图片格式。利用计算机处理图片的技术就可以准确的由已知光谱将未知谱线计算出来。计算的方案是利用插值法：如图 3，将 $\lambda_2 - \lambda_1$ 与 $d = l_1 - l_2$ 近似看成线性关系，则

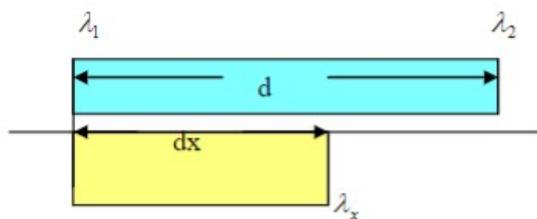


Figure 3: 插值法计算波长原理

$$\frac{\lambda_x - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{dx}{d} \Rightarrow \lambda_x = \lambda_1 + (\lambda_2 - \lambda_1) \frac{dx}{d}$$

3 实验仪器

汞灯及电源、氢灯及电源、氦灯及电源、狭缝、聚光透镜 L、准直透镜 L1、阿贝复合棱镜、会聚透镜 L2、彩色 CCD、计算机。

4 实验步骤

1. 用钢板尺调节光源、会聚透镜 L、狭缝中心处于等高共轴状态。打开氦灯源，开启 5 分钟后，使光源经会聚透镜 L 成一个缩小的实像，实像位于狭缝处并照亮狭缝。
2. 调节狭缝：通过狭缝上端的手轮调整，一般以 0.1mm 为宜，转动手轮时一定要用力均匀，轻柔。
3. 观察谱线：光源通过棱镜分光后，光谱成像在观察平板玻璃处，调节会聚透镜 L_2 的调节旋钮，使用目镜观察谱线直到清晰为止。从左到右记录观察到的谱线颜色、条数、强弱。更换光源，重复上述步骤。
4. 摄谱
 - (1) 将观察平板玻璃转换机构向上翻转 90° ，调整支撑 CCD 精密三维平台至合适位置，打开 CCD 遮光罩，将 CCD 成像面居中对准光谱平面位置。通过电脑捕获图像。
 - (2) 先将氦灯光源置于光路中，调整 CCD 至合适位置后，拍摄一次。保持位置不变，依次换上汞灯光源和钠灯光源，调整至 CCD 上出现清晰图像后拍摄。对拍摄的图像进行命名保存。
 - (3) 移动 CCD 至光谱的中间位置，重复上述过程；移动 CCD 至光谱的右边位置，重复上述过程。
5. 光谱分析：通过计算机图片处理技术，将每种光源的三张图片拼接成为完整光谱，再从谱线图上读出并记录谱线的坐标，用插值法计算待测谱线的波长。

5 测量记录

原始数据记录见“附件：原始数据”。

首先将氦灯光源置于光路中，调整 CCD 至合适位置后，再调整阿贝棱镜的角度以及狭缝宽度，直至显示器上出现清晰图像。拍摄。再将氦灯光源依次换为汞灯光源和钠灯光源进行拍摄。

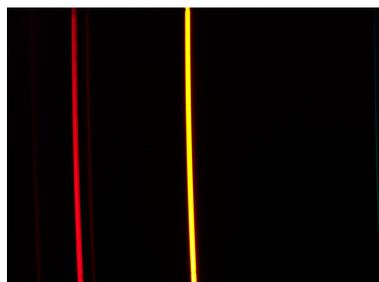


Figure 4: 氩-左

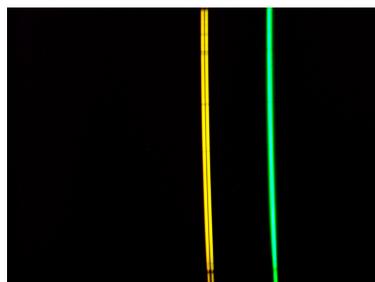


Figure 5: 汞-左

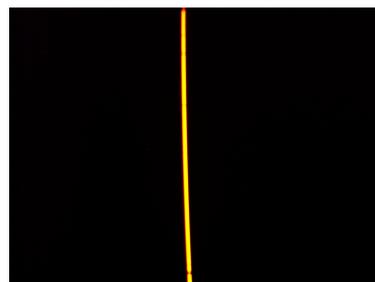


Figure 6: 钠-左

将光源换为氦灯后，将 CCD 挪至光谱的中间位置，重复上述操作。

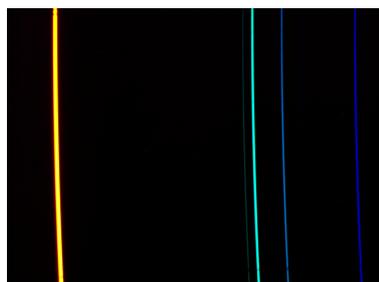


Figure 7: 氩-中

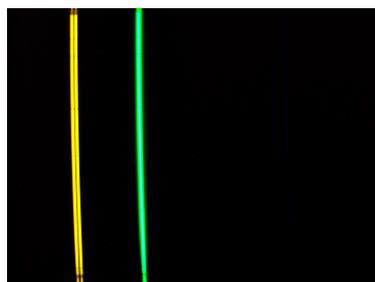


Figure 8: 汞-中



Figure 9: 钠-中

再将 CCD 移至光谱的右侧，重复上述操作：

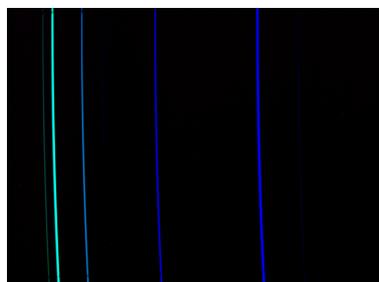


Figure 10: 氩-右

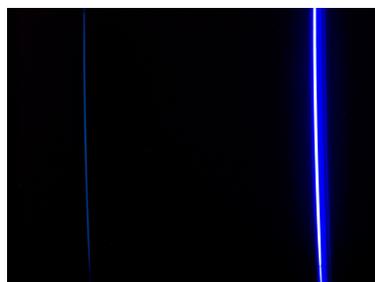


Figure 11: 汞-右



Figure 12: 钠-右

6 分析与讨论

6.1 数据处理

将三张图片通过计算机图片处理技术处理后：



Figure 13: 光谱图，从上至下依次为氦、汞、钠灯光谱

通过 windows 自带的画图软件打开图片后，读取光谱对应的像素点位置。

由于在画图软件中，谱线的宽度往往约为 10 像素，若直接读取则误差较大，因此首先读取谱线左右边缘的像素点，然后取平均值作为谱线的像素点位置。

Table 1: 氦灯谱线位置及其对应波长

氦灯光谱谱线	红	黄	绿	蓝
像素点位置	190	517	1084	1653
对应谱线的波长 (nm)	667.82	587.56	501.57	471.31

Table 2: 待测谱线位置

汞灯谱线	双黄线左谱线	绿	蓝	钠灯谱线	黄
像素点位置	561	749	1812	像素点位置	514
待测谱线	λ_{Hg1}	λ_{Hg2}	λ_{Hg3}	待测谱线	λ_{Na}

计算 λ_{Hg1} 时，以氦灯谱线的黄谱线波长为 λ_1 ，绿谱线波长为 λ_2 ，计算得：

$$\lambda_{Hg1} = \lambda_1 + (\lambda_2 - \lambda_1) \frac{d_x}{d} = 587.56 + (501.57 - 587.56) \frac{561 - 517}{517 - 1084} nm$$

$$\approx 581nm$$

计算 λ_{Hg2} 时，以氦灯谱线的黄谱线波长为 λ_1 ，绿谱线波长为 λ_2 ，计算得：

$$\begin{aligned}\lambda_{Hg_2} &= \lambda_1 + (\lambda_2 - \lambda_1) \frac{d_x}{d} = 587.56 + (501.57 - 587.56) \frac{749 - 517}{517 - 1084} nm \\ &\approx 552 nm\end{aligned}$$

计算 λ_{Hg_3} 时, 以氦灯谱线的绿谱线波长为 λ_1 , 蓝谱线波长为 λ_2 , 计算得:

$$\begin{aligned}\lambda_{Hg_3} &= \lambda_1 + (\lambda_2 - \lambda_1) \frac{d_x}{d} = 501.57 + (471.31 - 501.57) \frac{1812 - 1084}{1653 - 1084} nm \\ &\approx 463 nm\end{aligned}$$

计算 λ_{Na} 时, 以氦灯谱线的红谱线波长为 λ_1 , 黄谱线波长为 λ_2 , 计算得:

$$\begin{aligned}\lambda_{Na} &= \lambda_1 + (\lambda_2 - \lambda_1) \frac{d_x}{d} = 667.82 + (587.56 - 667.82) \frac{514 - 190}{517 - 190} nm \\ &\approx 588 nm\end{aligned}$$

6.2 误差分析

查表得到, 汞灯待测的三条谱线的波长分别为 579.07nm, 546.00nm, 491.60nm. 由此可以计算实验测得的误差分别为:

$$\begin{aligned}\Delta_{\lambda_{Hg_1}} &= \frac{|581 - 579.07|}{579.07} \times 100\% \approx 0.3\% \\ \Delta_{\lambda_{Hg_2}} &= \frac{|552 - 546.00|}{546.00} \times 100\% \approx 1\% \\ \Delta_{\lambda_{Hg_3}} &= \frac{|463 - 491.60|}{491.60} \times 100\% \approx 6\%\end{aligned}$$

查表得钠灯的光谱对应的波长为 589.30nm, 计算误差为:

$$\Delta_{\lambda_{Na}} = \frac{|588 - 589.30|}{589.30} \times 100\% \approx 0.2\%$$

分析误差原因:

1. 波长与光谱谱线位置并非完全线性

由棱镜的折射规律, 最小偏向角计算为:

$$n = \frac{\sin \frac{\delta_{min} + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$$

$$\delta_{min} = 2 \arcsin(n \sin \frac{A}{2}) - A$$

因此棱镜折射本身并非线性的, 实验本身存在系统误差。

2. 狭缝非完全竖直

实验过程中，实验者发现狭缝有一定的倾斜角度，导致光谱上的谱线同样有一定倾斜的角度。实验者尝试调整狭缝，但最终由于无法拧动螺丝而无法调整。由于谱线的倾斜角度大致相同，理论上并不会给实验带来误差。

但实际数据处理过程中，由于读取数据时无法完全保证所取数据点均在一条水平线上，故可能产生误差。

3. 光源误差

实验过程中，观察到光谱中出现了一些较暗的谱线。这种谱线出现原因往往为光源中存在别的元素。较暗的谱线可能会对读数产生一定影响。

4. 读数误差

实际读数时，画图软件上显示一条谱线的左右两侧读数相差约为 10 像素。笔者采取的做法是，首先分别读取谱线左右两侧的像素值，再取均值作为谱线像素点的位置，从而减小误差。但读数过程仍然有随机误差。

5. 图片处理误差

本实验中需要通过图片处理技术将 9 张图片拼接成三个完整的光谱。但由于实际拼接过程中，拼接的谱线可能出现不能完全重合的情况，因此存在一定误差。

6.3 实验讨论

实验中存在的误差见“6.2. 误差分析”。

实验改进：

1. 取像素点的位置时，重复读数三次取平均值，减小随机误差。
2. 更换狭缝零件，从而使狭缝竖直。
3. 使用专业的图像处理软件（如 photoshop 等）或使用软件对图片中的谱线自动对齐，防止手动调整图片位置可能出现的误差。

7 思考题

1. 实验中影响光谱清晰度的调节机构有哪些？

- (1) 阿贝棱镜的角度：实验中，棱镜角度可以通过调节螺栓进行调节。通过调节阿贝棱镜的角度，可以调节光线入射角度，从而调整光谱清晰度。
- (2) 狭缝宽度：狭缝宽度过宽时，入射光过强易导致光谱清晰度较低；狭缝宽度过窄，则光谱亮度过弱，清晰度同样较低。

(3) 会聚透镜的位置：通过改变会聚透镜的位置，可以让光源出射的光线刚好会聚在狭缝，从而提高清晰度。

(4) 光源位置：调整光源的距离可以改变入射光的强弱，从而影响光谱清晰度。

2. 实验中，CCD 靶面的横向宽度小于光谱成像面的横向宽度，实验中是如何完成的？

以氢的谱线作为已知谱线，分段拍摄 Hg 和 Na 的光谱，保持每段拍摄时位置不变。记录成图片格式后，利用计算机处理图片技术，先将每段拍摄的图片组合，再通过氢的光谱拼接图片，组合成完整的光谱。

3. 本实验中，能否将光谱成像面的横向宽度做到小于或等于 CCD 的靶面横向宽度？如果能，怎么做？实际实验中未做，可能的原因是什么？

可以。将 CCD 后移，直至电脑显示器上出现完整光谱。

此种方法可能相较于分段拍摄清晰度较弱，可能出现无法辨别个别谱线的问题。并且，由于狭缝未必完全竖直，可能会出现谱线有弯曲的情况，导致计算光的波长时产生误差。

4. 三棱镜可以作为分光元件的原因是什么？

不同波长的光在三棱镜中的折射率不同。一束平行光入射后，不同波长的光在三棱镜折射后的弯曲程度不同，会向不同的方向出射，因此可以作为分光元件。

附件

原始数据