

预习报告		实验记录		分析讨论		总成绩	
25		30		25		80	

年纪、专业:	物理学	组号:	实验班 2
姓名:	戴鹏辉	学号:	2344016
时间:	2024/03/05	教师签名:	

CA3 原子的发射和吸收光谱观测分析实验

【实验报告注意事项】

1. 实验报告由三部分组成:

- (1) 预习报告: 课前认真研读实验讲义, 实验所需的仪器设备、用具及其使用、完成课前预习思考题; 了解实验需要测量的物理量, 并根据要求提前准备实验记录表格 (可以参考实验报告模板, 可以打印)。**(25 分)**
- (2) 实验记录: 认真、客观记录实验条件、实验过程中的现象以及数据。实验记录请用珠笔或者钢笔书写并签名 (用铅笔记录的被认为无效)。保持原始记录, 包括写错删除部分, 如因误记需要修改记录, 必须按规范修改。(不得输入电脑打印, 但可扫描手记后打印扫描件); 离开前请实验教师检查记录并签名。**(30 分)**
- (3) 数据处理及分析讨论: 处理实验原始数据 (学习仪器使用类型的实验除外), 对数据的可靠性和合理性进行分析; 按规范呈现数据和结果 (图、表), 包括数据、图表按顺序编号及其引用; 分析物理现象 (含回答实验思考题, 写出问题思考过程, 必要时按规范引用数据); 最后得出结论。**(25 分)**

实验报告就是将预习报告、实验记录、和数据处理与分析合起来, 加上本页封面。

2. 每次完成实验后的一周内交实验报告 (特殊情况不能超过两周)。

3. 注意事项:

- (1) 实验中**光纤不能过度弯折**;
- (2) 信号强度不能过饱和值;
- (3) 光源长时间通电后会**发热**, 小心烫手, 切换光源时务必注意 (可等断电冷却后再碰);
- (4) **请提前了解光纤光谱仪的基本工作原理与关键参数等。**

目录

1 CA3 原子的发射和吸收光谱观测分析实验 预习报告	3
1.1 实验目的	3
1.2 仪器用具	3
1.3 原理概述	3
1.4 实验前思考题	6
2 CA3 原子的发射和吸收光谱观测分析实验 实验记录	7
2.1 实验内容和步骤	7
2.1.1 实验一 原子发射光谱的观测	7
2.1.2 实验二 原子吸收光谱的观测	8
2.2 实验过程中遇到的问题记录	10
3 CA3 原子的发射和吸收光谱观测分析实验 分析与讨论	11
3.1 实验数据分析	11
3.1.1 实验一 原子发射光谱的观测	11
3.1.2 实验二原子吸收光谱的观测	13
3.2 实验后思考题	16

CA3 原子的发射和吸收光谱观测分析实验 预习报告

1.1 实验目的

1. 原子发射光谱的观测:
 - (a) 学习光纤光谱仪的使用;
 - (b) 观测钠原子光谱, 了解碱金属原子光谱的一般规律;
 - (c) 观测汞原子光谱, 了解中外层电子与原子核相互作用;
 - (d) 观测多种光源的发射光谱, 了解线光谱与连续谱的异同。
2. 原子吸收光谱的观测:
 - (a) 调配不同浓度的高锰酸钾水溶液;
 - (b) 测量高锰酸钾水溶液的紫外-可见吸收光谱, 找出吸收峰;
 - (c) 测量不同浓度高锰酸钾水溶液的紫外-可见吸收光谱, 验证比尔定律;
 - (d) 测量不同片数玻璃基板的透过光谱, 验证朗伯定律。

1.2 仪器用具

编号	仪器用具名称	数量	主要参数 (型号, 测量范围, 测量精度等)
1	多种光源	若干	低压汞灯、低压钠灯、氢氘灯、溴钨灯、多种颜色的发光二极管
2	滤光片	2	白片、红片
3	测控计算机	1	
4	光谱观测和分析仪器	1	光纤光谱仪
5	高锰酸钾水溶液	—	
6	玻璃基板	1	
7	比色皿	1	

1.3 原理概述

1. 原子发射光谱的观测:
 - (a) 碱金属原子光谱:

碱金属和氢原子一样, 核外只有一个价电子, 但在碱金属原子中除了一个价电子外, 还有封闭在

内的壳层电子，这些内封闭的电子和原子核统称为原子实。当价电子贯穿原子实时，会产生异于氢原子光谱的一系列特点。碱金属原子光谱线公式为：

$$\tilde{v} = R \left(\frac{1}{n_2^{*2}} - \frac{1}{n_1^{*2}} \right) = \frac{R}{(n' - \mu'_{l'})^2} - \frac{R}{(n - \mu_l)^2}$$

其中， \tilde{v} 为光谱线的波数； R 为里德堡常数； n' 与 n 分别为始态和终态的主量子数； n_2^* 与 n_1^* 分别为始态和终态的有效量子数； l 与 l' 分别为该量子数决定之能级的轨道量子数； $\mu'_{l'}$ 与 μ_l 分别为始态和终态的量子缺（也称量子改正数，量子亏损）。

以钠原子为例来说，它的光谱分四个线系：主线系、锐线系、漫线系、基线系。对于某一线系谱线的波数公式可写为：

$$\tilde{v} = A_{n'l'} - \frac{R}{(n - \mu_l)^2}$$

从钠原子光谱中，可以看出各个线系的一些明显特征，这些特征也为其它碱金属原子光谱所具有。各线系的共同特点是：

- i. 同一线系内，随着波长减小（即向短波方向），相邻谱线的波数差逐渐减小，最终趋于一个极限，即连续谱与分立谱的边界。这是由于能级愈高，能级间的距离愈小，最终能级间的差别变得模糊。
- ii. 在同一线系内，随着波长减小，谱线的强度逐渐减小。这是因为能级愈高，将原子从基态激发到该状态的能量也愈大，因此愈向短波方向，激发原子的难度愈大。

各线系的区别：

- i. 各线系所在的光谱区域不同。主线系的谱线大部分在紫外区，只有双黄线（钠的主共振线）在可见光区。锐线系和漫线系的谱线大部分在可见光区，基线系的谱线则在红外区。
- ii. s 能级是单重的，p、d、f 能级是双重的。主线系和锐线系的谱线是双线的，漫线系和基线系的谱线是复双重线的。主线系的双线是由于 3s 能级与 3p、4p 等能级间的阶跃产生的，锐线系的双线则是内 3p 能级与各 s 能级之间的跃迁产生的。
- iii. 从谱线的外观上看，主线系的谱线强度较大，锐线系的谱线轮廓清晰，漫线系的谱线显得弥漫，一般复双重线连成一片。

(b) 单色仪色散系统：

单色仪是一种用于分离和选择特定波长光线的光学仪器，其色散系统可以分为棱镜单色仪和光栅单色仪两种类型。棱镜单色仪使用棱镜作为色散元件，通过折射不同波长光线的角度差异实现色散。而光栅单色仪则使用光栅作为色散元件，利用光栅的周期性结构引起光的衍射，不同波长的光线经过衍射后呈现不同的衍射角度，从而实现色散。通过调整色散元件的位置或角度，单色仪可以选择性地分离和选择特定波长的光线，最终产生单色光用于实验或分析。

(c) 光谱仪和光学多通道分析仪：

光谱仪是一种用于记录光线的波长和强度分布的仪器，它包括棱镜光谱仪和光栅光谱仪两种类型。光谱仪的工作原理是利用棱镜或光栅将入射光线按波长分散成不同的光束，然后利用光电倍增管、CCD 或 CMOS 传感器等设备记录这些光束，形成光谱图像。光学多通道分析仪是一种光谱仪的变体，它包括光栅单色仪、CCD 或 CMOS 接收单元、扫描系统、电子放大器、A/D 采集单元和

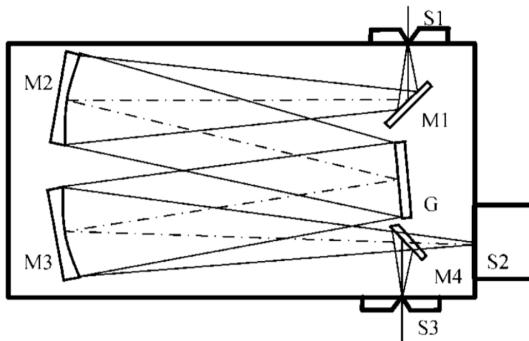


图 1: 光学多通道分析仪原理示意图

计算机等组件。光学多通道分析仪通过这些组件实现对光谱的高效捕获和分析，具有高分辨率和精确度的特点。

2. 原子吸收光谱的观测:

(a) 光的吸收:

在吸收过程中，物质的原子或分子吸收了入射的辐射能，从基态跃迁至高能级的激发态，吸收的能量与电磁辐射的频率成正比，符合普朗克公式：

$$E = h\nu$$

光的吸收是指光波穿过介质后光强减弱的现象。除了真空中，几乎所有介质对电磁波都不完全透明，都会发生吸收。根据吸收特性，吸收可分为一般吸收和选择吸收。一般吸收是指在一定波长范围内，物质对光的吸收不随波长变化；选择吸收则是指吸收随波长变化的现象。物质分子的能级结构决定了其吸收电磁辐射的能力，能级间的能量差越大，吸收越小，形成了一般吸收和选择吸收的特性。吸收分光光度法利用物质分子对电磁辐射的选择吸收特性，用于测量物质的吸收光谱，从而进行分析和研究。

(b) 朗伯定律:

朗伯定律 (Lambert's law) 是描述光线透过吸收性均匀介质时光强衰减规律的基本定律。朗伯定律的数学表示式为：

$$I = I_0 e^{-kl}$$

吸收系数 k 是波长的函数，在一般吸收的波段内， k 值很小，并且近乎于一常数；在选择吸收波段内， k 值甚大，并且随波长的不同而有显著的变化。

(c) 比尔定律:

比尔定律 (Beer's law)，也称为比尔-朗伯定律 (Beer-Lambert law)，是描述光线透过吸收性均匀介质时光强衰减规律的定律，是朗伯定律的一个特例。比尔定律的数学形式为：

$$A = \alpha cl$$

A 表示吸光度， α 是摩尔吸光系数， c 为浓度， l 是光通过溶液的路径长度。在比尔定律成立时，就可用测量吸收的方法来测定物质的浓度。这就是快速测定物质浓度的吸收光谱分析法。

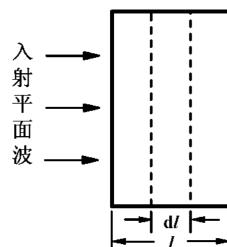


图 2: 均匀媒质对光的吸收

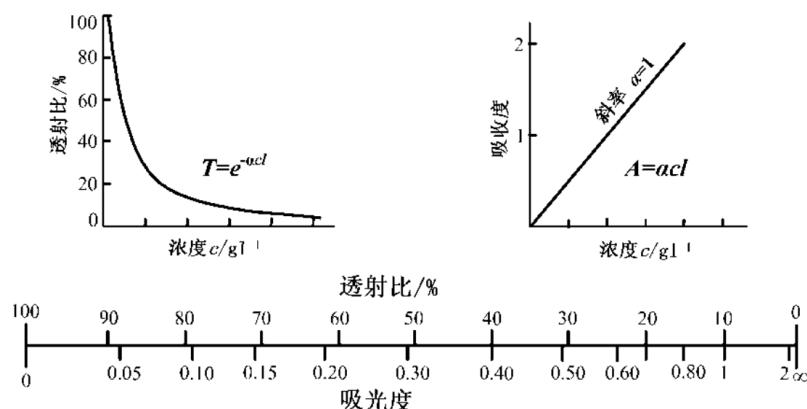


图 3: 比尔定律示意图和吸收度、投射比标度的比较

1.4 实验前思考题

思考题 1.1: 日常生活中，光源可以分为热光源和冷光源，请分别说明太阳光、蜡烛、白炽灯、荧光灯、LED 灯等属于哪一类光源，为什么？

在日常生活中，光源可以分为热光源和冷光源两类，它们的区别在于发光原理不同。

1. 热光源：热光源的发光原理是物体受热后发出的光。典型的热光源包括太阳光和白炽灯。太阳光是地球主要的光源，它的光谱是连续的，包含了可见光、紫外线和红外线等各种波长的光。白炽灯的发光原理是通电后灯丝受热发光，因此也属于热光源。
2. 冷光源：冷光源的发光原理是物质受激发后发出的光。典型的冷光源包括蜡烛、荧光灯和 LED 灯。蜡烛的燃烧产生火焰，火焰中的碳颗粒被激发后发出光，因此属于冷光源。荧光灯通过电流激发荧光粉发光，LED 灯则是通过半导体材料电子跃迁产生光，它们都属于冷光源。

综上所述，太阳光和白炽灯属于热光源，而蜡烛、荧光灯和 LED 灯属于冷光源。

专业:	物理学	年级:	2022 级
姓名:	戴鹏辉	学号:	22344016
室温:	26°C	实验地点:	A501
学生签名:		评分:	
实验时间:	2024/03/07	教师签名:	

CA3 原子的发射和吸收光谱观测分析实验 实验记录

2.1 实验内容和步骤

2.1.1 实验一 原子发射光谱的观测

1. 拍摄钠灯光谱

- (a) 选择合适的积分次数和积分时间。实际实验中选择了“积分时间 2ms，积分次数 100 次”
- (b) 将光纤一端连接光谱仪，一端关闭，测量暗噪声。
- (c) 将光纤另一端装上支架，将支架对准环境，测量环境噪声。
- (d) 将暗噪声与环境噪声都扣除后，将支架对准钠灯，测量钠灯光谱。

得到的钠灯光谱如图4所示：将所得图片放大，可看到著名的纳双黄线，测得波长值分别为 $\lambda_1 = 588.72nm$ 和 $\lambda_2 = 589.34nm$

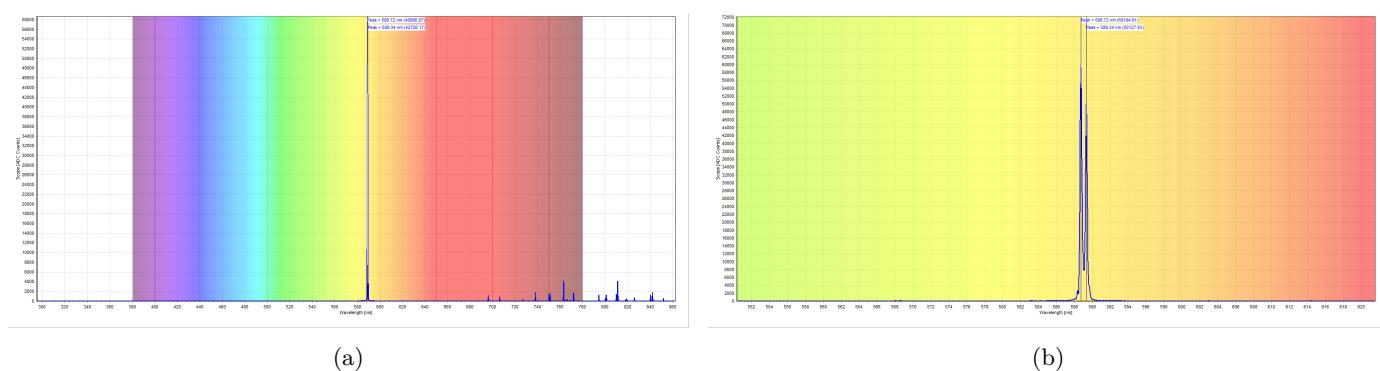


图 4: 钠灯谱线

2. 拍摄汞灯光谱

重复上述步骤，测量暗噪声和环境噪声。将暗噪声与环境噪声都扣除后，将支架对准汞灯，测量汞灯光谱。

得到的汞灯光谱如图5所示, 可看到 545.90nm, 435.59nm, 404.41nm, 578.85nm 和 576.65nm 的谱线, 最高峰是 545.90nm

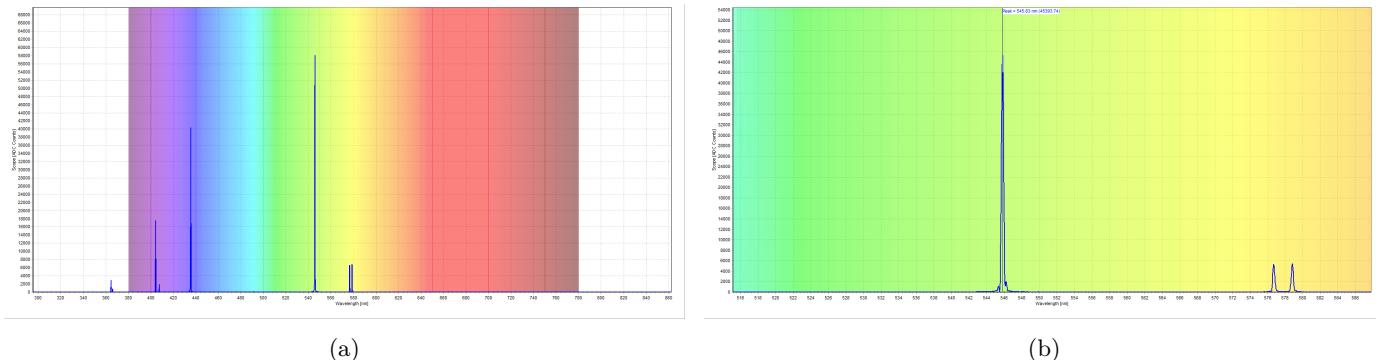


图 5: 汞灯谱线

3. 拍摄手机屏幕光谱

重复上述步骤, 测量暗噪声和环境噪声。将暗噪声与环境噪声都扣除后, 将支架对准手机屏幕, 测量手机屏幕光谱。其中手机显示全白画面。

得到的手机屏幕光谱如图6所示:

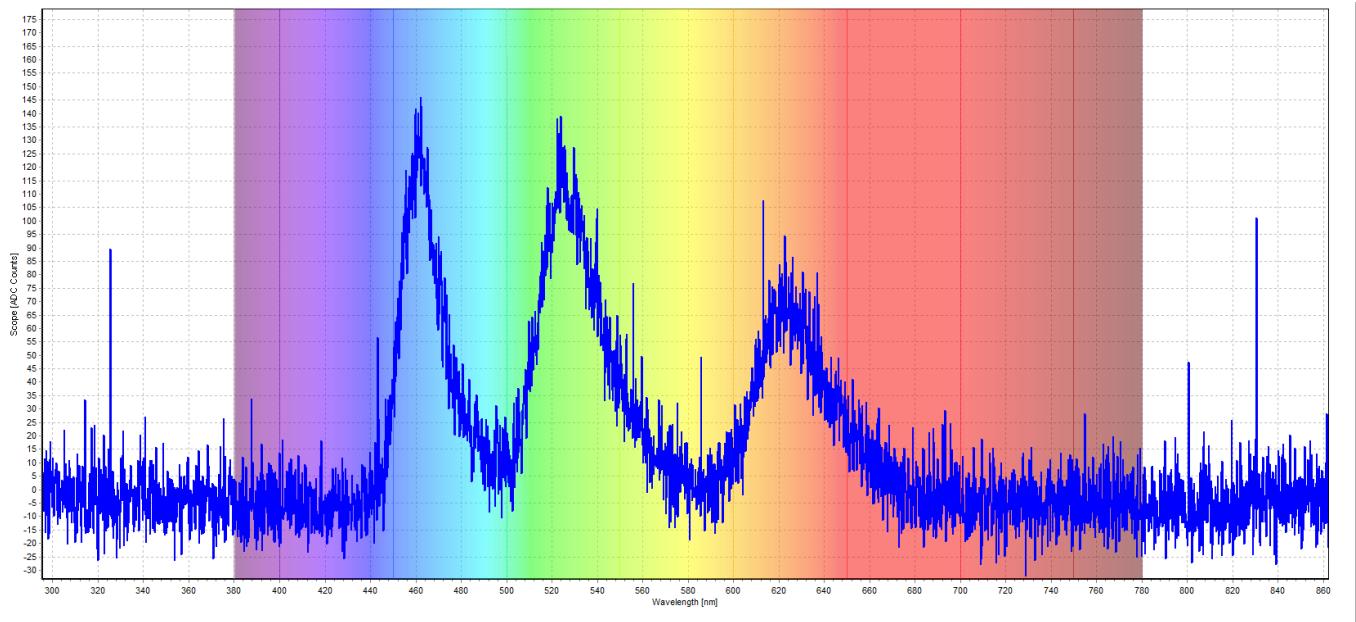


图 6: 手机屏幕光谱

2.1.2 实验二 原子吸收光谱的观测

1. 验证比尔定律

- 准备待测溶液。实验中所用溶液为清水和 $KMnO_4$ 溶液, 浓度为 $0.1g/L$, $0.08g/L$, $0.06g/L$,

$0.04g/L$, $0.02g/L$, $0.01g/L$.

- (b) 按照实验一的做法, 设置合适的积分时间和积分次数, 消除暗噪声和环境噪声。
- (c) 选择吸光度模式, 测量各种浓度 $KMnO_4$ 溶液和清水的吸收曲线。
- (d) 测量完所有浓度溶液的吸收曲线后, 将所有数据放置在同一张图上进行对比。

得到实验结果如图7所示

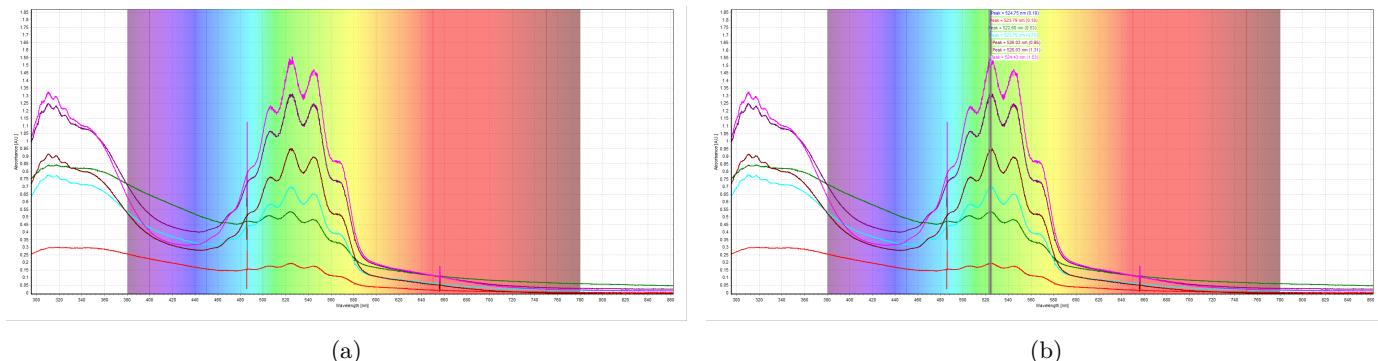


图 7: 不同溶液浓度吸收率曲线

2. 验证朗伯定律

- (a) 按照实验一的做法, 设置合适的积分时间和积分次数, 消除暗噪声和环境噪声。
- (b) 选择透射率模式, 测量放置不同数量玻璃片的透射曲线。
- (c) 测量完所有数量玻璃片的透射曲线后, 将所有数据放置在同一张图上进行对比。

实验结果如图8所示

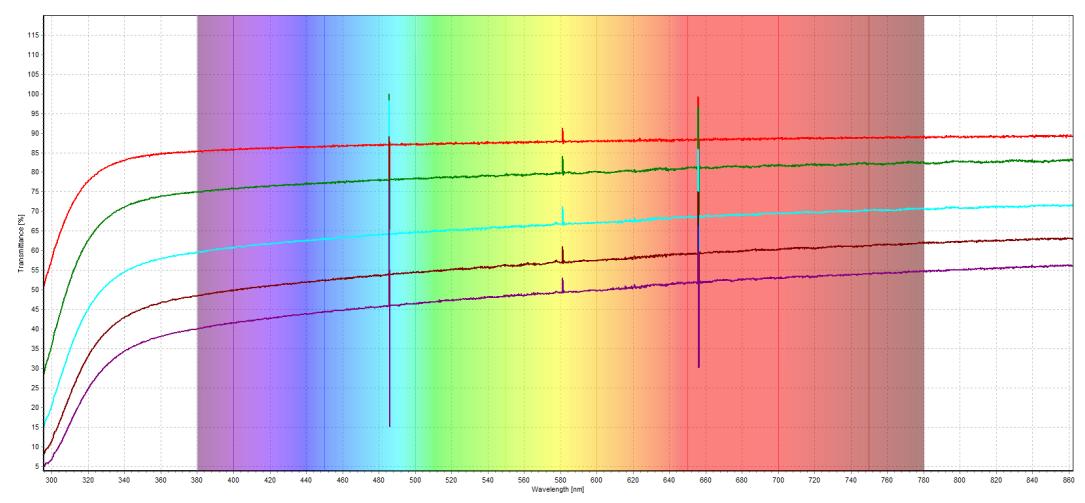


图 8: 不同数量玻璃片的透射率曲线

2.2 实验过程中遇到的问题记录

1. 一定要按照规范要求和步骤消除暗噪声和环境噪声，否则得到的实验数据会有很严重的毛刺，给数据分析带来麻烦。
2. 在测量原子发射光谱时，要注意测量值不能饱和，否则无法看出不同谱线之间的能量差异，甚至可能会将杂波也当作谱线。
3. 在测量 $KMnO_4$ 溶液的吸收曲线时，要注意标签不能阻挡光路。

专业:	物理学	年级:	2022 级
姓名:	戴鹏辉	学号:	22344016
日期:	2024/03/10		
评分:		教师签名:	

CA3 原子的发射和吸收光谱观测分析实验 分析与讨论

3.1 实验数据分析

3.1.1 实验一 原子发射光谱的观测

1. 拍摄钠灯光谱

查阅资料可知, 钠原子能级的量子亏损数如图9所示

l	n	3	4	5	6	7	8
0	1.373	1.358	1.354	1.352	1.351	1.351	
1	0.883	0.867	0.862	0.860	0.859	0.858	
2	0.0110	0.0134	0.0145	0.0156	0.0161	0.0155	
3	-	0.0019	0.0026	0.0029	0.0036	0.0043	

图 9: 钠原子能级的量子数亏损 μ_l

钠原子光谱的主线系只有 $\tilde{v} = 3p \rightarrow 3s$ 的二条谱线 (钠双黄线) 是在可见区, 其余在紫外区。则根据公式:

$$\tilde{v} = R \left(\frac{1}{n_2^{*2}} - \frac{1}{n_1^{*2}} \right) = \frac{R}{(n' - \mu'_{l'})^2} - \frac{R}{(n - \mu_l)^2}$$

初态为 $3p$ 能级, $n = 3$, $l = 1$, $\mu_l = 0.883$; 末态为 $3s$ 能级, $n' = 3$, $l' = 0$, $\mu'_{l'} = 1.373$

则代入公式, 计算得到

$$\frac{1}{\lambda} = \tilde{v} = \frac{R}{(n' - \mu'_{l'})^2} - \frac{R}{(n - \mu_l)^2} = 1.097373157 \times 10^7 \times \left[\frac{1}{(3 - 1.373)^2} - \frac{1}{(3 - 0.883)^2} \right] m^{-1} \approx \frac{1}{589.3 nm}$$

再利用自旋-轨道相互作用等相关理论, 即可计算出 $3p$ 的能级分裂, 得到纳双黄线的具体波长数值。因能级分裂造成的双线结构波长差 $\Delta\lambda = 0.6 nm$, 实验与理论结果基本吻合。

2. 拍摄汞灯光谱

通过查阅相关资料得到标准数据, 对比实验数据与标准数据, 根据公式

$$\eta = \frac{|\lambda - \lambda_0|}{\lambda_0}$$

计算相对误差, 结果如表1: 相对误差均在 0.05% 左右, 说明实验精度还是较高的。

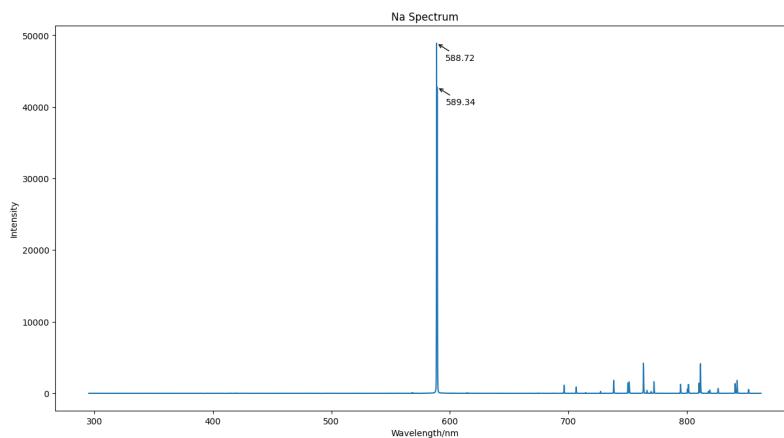


图 10: 实验测得的钠灯光谱

谱线颜色	实验值/nm	标准值/nm	相对误差
黄色	578.85	579.1	0.04%
黄色	576.65	577.0	0.06%
绿色	545.90	546.1	0.04%
蓝色	435.59	435.8	0.05%
紫色	404.41	404.7	0.07%

表 1: 理论值与实验值对比

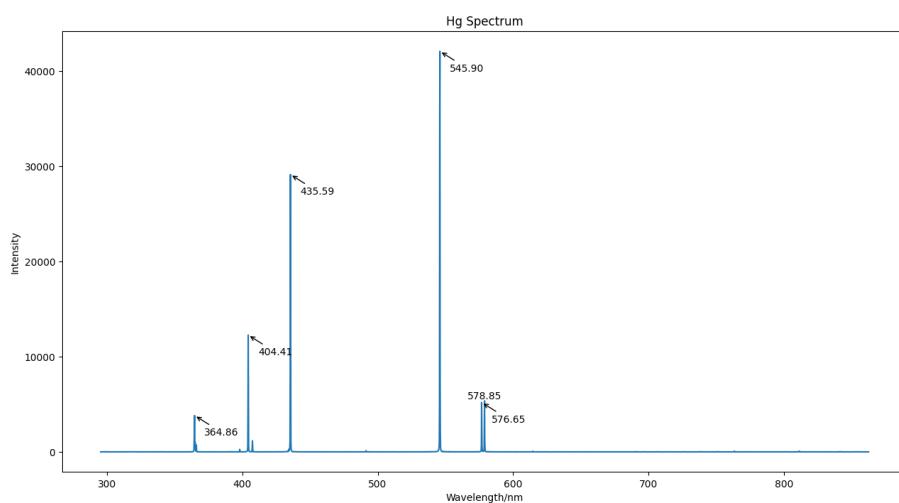


图 11: 实验测得的汞灯光谱

3. 拍摄手机屏幕光谱

观察图12可以发现，手机所发出的光谱是连续谱，并且在“红”“绿”“蓝”三色的强度较高。

这是由于手机屏幕通常采用的是发光二极管(LED)技术。在手机屏幕上，红色通常由铝镓砷(AlGaAs)或镓磷化铝(AlInGaP)LED发出，绿色通常由铟镓磷(InGaN)LED发出，蓝色通常由氮化镓(GaN)LED发出。这些LED发出的光在光谱中会表现为特定的谱线，即红、绿、蓝三色。

在LED中，电流通过半导体材料时，激发了材料中的电子，使其跃迁到一个较高能级，然后再返回到低能级。当电子跃迁时，会释放能量，这些能量以光子的形式释放出来，产生光。不同的半导体材料和材料结构会导致释放的光子具有不同的能量和频率。在手机屏幕中，红色、绿色和蓝色LED分别释放的光子具有不同的频率，形成了连续的光谱。

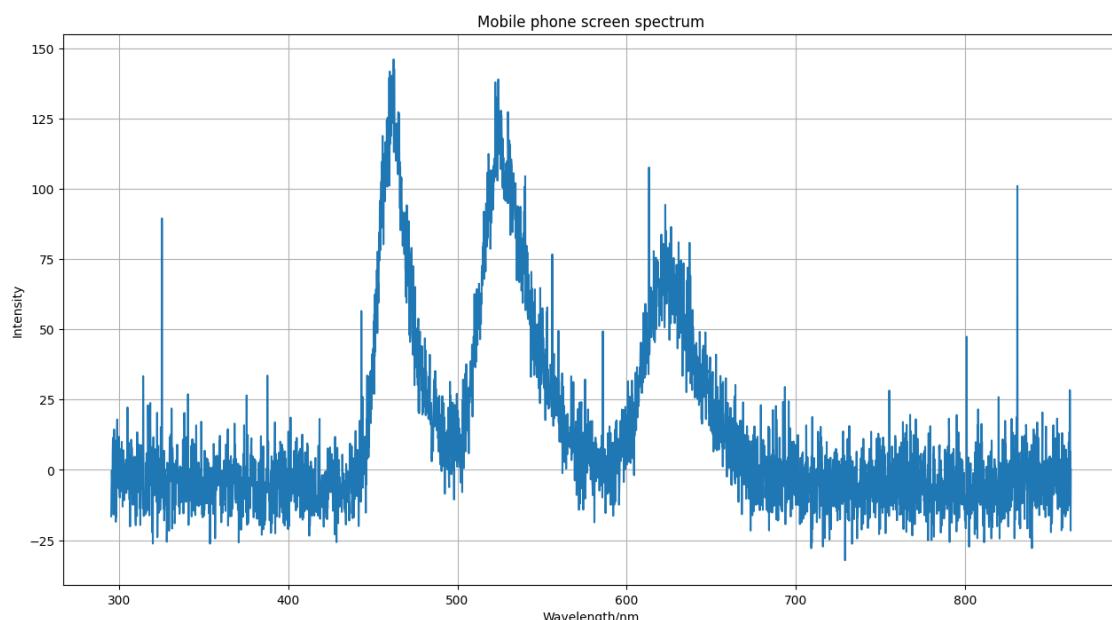


图 12: 手机屏幕光谱

3.1.2 实验二原子吸收光谱的观测

1. 验证比尔定律

将得到的数据绘制在一张表内，如图13所示

初步观察可知三个大吸收峰集中在500nm-600nm之间，则放大后，将三个吸收峰都标出，如图14所示
将所得数据绘制成表，如表2所示

则以浓度为横轴，吸收率为纵轴，绘制线性拟合图。如图15所示

比尔定律的数学形式为：

$$A = \alpha cl$$

A 表示吸光度， α 是摩尔吸光系数， c 为浓度， l 是光通过溶液的路径长度。

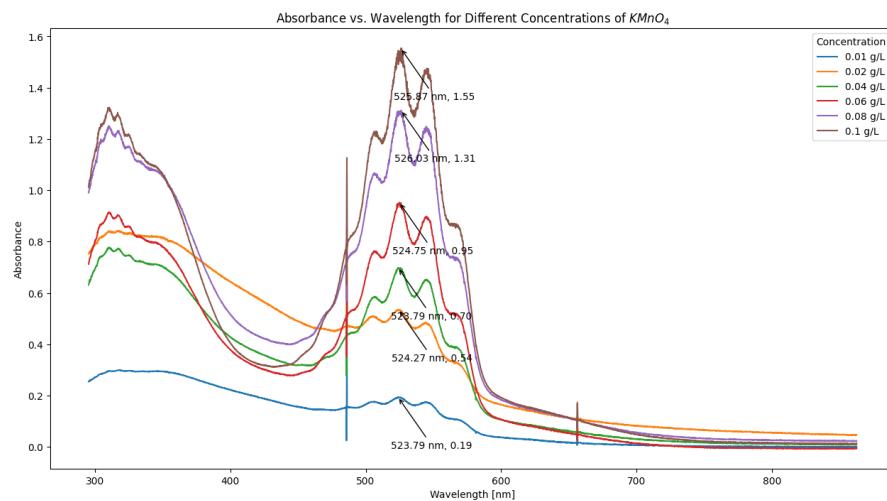
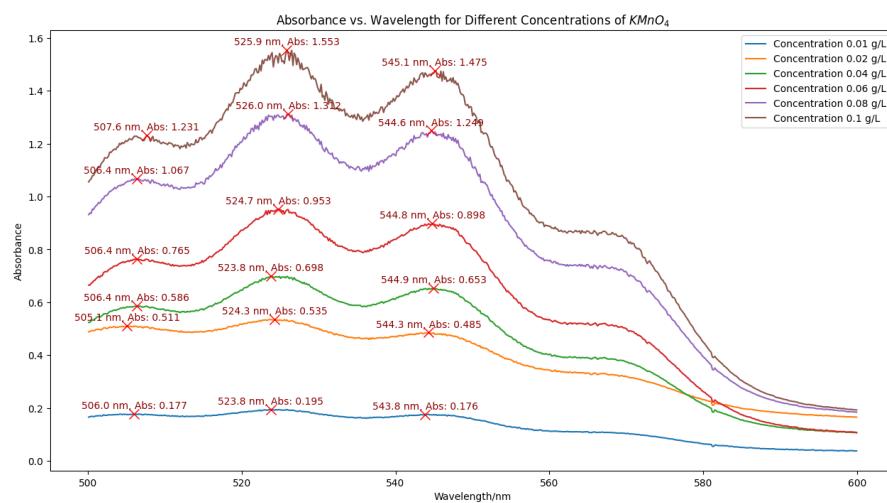
图 13: 不同浓度的 $KMnO_4$ 溶液对吸收率的影响

图 14: 三个吸收峰

浓度/(g/L)	吸收峰 1	吸收峰 2	吸收峰 3
0.01	1.231	1.553	1.475
0.02	1.067	1.312	1.249
0.04	0.765	0.953	0.898
0.06	0.586	0.698	0.653
0.08	0.511	0.535	0.485
0.1	0.177	0.195	0.176

表 2: 同一吸收峰对应的不同浓度溶液的吸收率

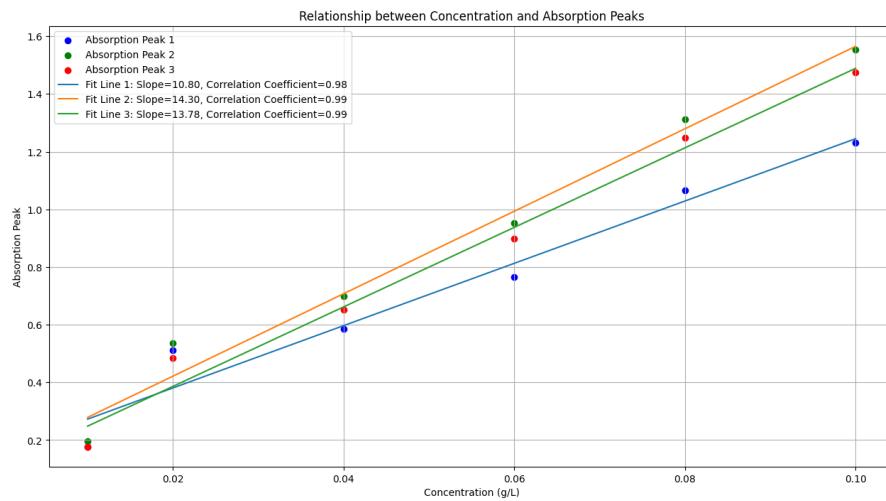


图 15: 浓度与吸收率之间的关系

α 和 l 都是常数，则只需要验证 A 与 c 的线性关系，即可验证比尔定律。

由计算结果可以看出，相关系数均在 0.98 以上，说明数据之间有很强的线性相关性质，则验证了比尔定律成立。

2. 验证朗伯定律

将所得数据绘制成图，如图16所示

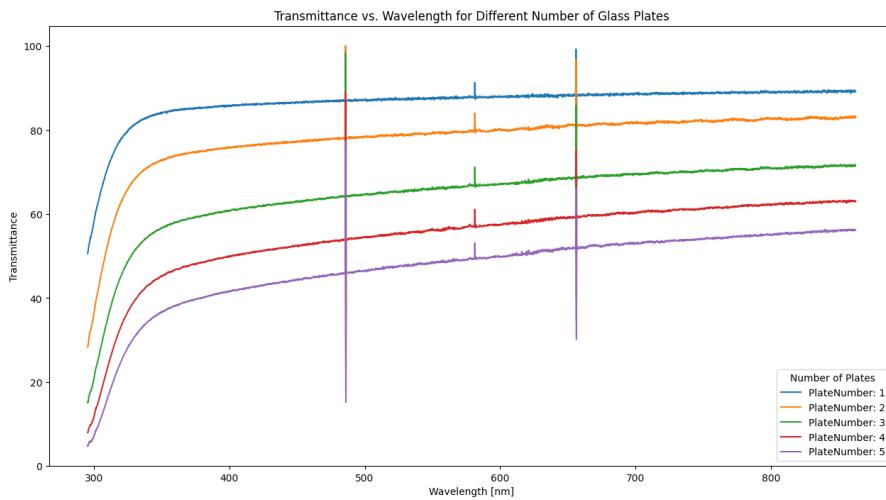


图 16: 拨片数量与透射率的关系

取 500nm, 600nm, 700nm 三个波长分析，玻璃片数量做横轴，透射率的自然对数做纵轴，绘制线性拟合图像，如图17所示

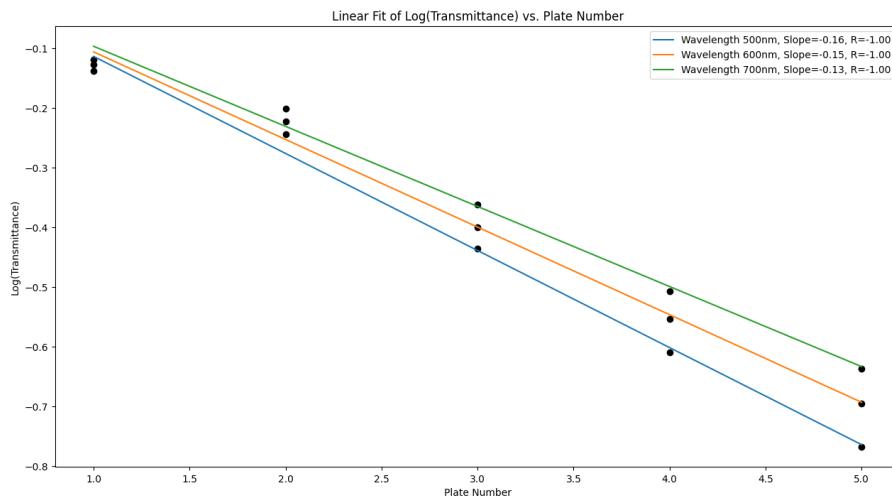


图 17: 拨片数量与透射率的关系

朗伯定律的数学表示式为:

$$I = I_0 e^{-kl}$$

吸收系数 k 是波长的函数，在一般吸收的波段内， k 值很小，并且近乎于一常数。

则经过数学变形，得到如下公式：

$$\ln \frac{I}{I_0} = -kl$$

则只需要验证透射率的自然对数 $\ln \frac{I}{I_0}$ 与 l 的线性关系即可验证朗伯定律，且得到的斜率是吸收系数的相反数。

由计算结果可知，相关系数均为-1，即数据之间的线性关系非常强，则可验证朗伯定律。

3.2 实验后思考题

思考题 3.1： 钠灯光谱有哪些特征？能否从光谱图上判别各谱线所属线系？举例说明。

钠灯有以下几个显著特征

1. 双线结构：钠灯光谱主要由两条明显的谱线组成，分别位于黄色和橙色区域。这两条谱线称为钠 D 线，波长分别约为 589.0 nm（黄线）和 589.6 nm（橙线）。
2. 窄线宽：钠灯的谱线非常窄，说明其光源是相对单色的。
3. 强度不均：两条谱线的强度不完全相等，通常黄线比橙线略强。

从光谱图上可以判别各谱线所属的线系。例如，钠原子光谱有四个线系：主线系、锐线系、漫线系、基线系。

谱线的判别可以通过观察其形状和宽度来进行。锐线系的谱线通常较尖锐，而漫线系的谱线则较为平滑。例如，如果在光谱图上观察到一条尖锐的谱线，它可能属于锐线系。而一条较宽且平滑的谱线可能属于漫线系。

思考题 3.2: 在发射光谱和吸收光谱测量中，光路有何异同？

相同点：

- 都是由光源发射光经过光纤导入进光栅光谱仪，然后软件根据得到的数据进行数据分析。

不同点：

- 在发射光谱的测量实验中，光源发出的光直接通过环境，经过光纤导入进光谱仪；而在吸收光谱的实验中，光源发出的光首先会经过样品，然后再通过光纤导入进光谱仪。

思考题 3.3: 根据高锰酸钾溶液的吸收光谱，应如何选择理想光源，为什么？

选择理想的光源来测量高锰酸钾溶液的吸收光谱时，需要考虑以下几个因素：

- 波长范围：**高锰酸钾的吸收光谱在紫外-可见光区域（约 200-700 nm）都有特征吸收峰，因此理想的光源应该能够提供这个波长范围内的连续光谱。
- 光强：**光源的光强应足够高，以确保光在经过高锰酸钾溶液后仍然能够被探测器检测到。在吸收光谱测量中，通常希望光强尽可能高，以提高信噪比。
- 稳定性：**光源应该具有良好的光谱稳定性，即光强和波长不随时间变化太多，以确保测量结果的准确性和可重复性。
- 波长调节能力：**为了匹配高锰酸钾吸收峰的波长，理想的光源应该具有波长调节能力，可以在需要时调节输出光的波长。

基于以上因素，常用的理想光源包括氘灯和钨灯。氘灯在紫外光谱区域（约 200-400 nm）具有很高的光强，而钨灯在可见光和近红外光谱区域（约 400-700 nm）具有很高的光强。因此，结合氘灯和钨灯的优势可以覆盖高锰酸钾溶液吸收光谱的整个波长范围。



图 18: 整理后实验桌照片