

单色仪定标与光谱测量

唐延宇 PB22030853

2024 年 5 月 29 日

摘要

光栅单色仪是利用衍射光栅具有的分光特性,提取出复色光中线宽极窄的单色光的装置.本实验的主要内容为利用钠原子主线系的第一对双线对光栅单色仪进行定标,并利用它完成对钠原子多条谱线系的测量,并由此测量数据得到里德伯常数及光栅的分辨率.最后利用单色仪测量红宝石晶体的发射与吸收光谱.

关键词: 衍射光栅 钠原子光谱 红宝石晶体

1 引言

1.1 实验背景

单色仪指从一束复色光(含有多种频率成分)中提取出波长范围极窄的单色光的仪器,大致可分为棱镜单色仪和光栅单色仪两种.1666 年,牛顿在发现白光经过三棱镜后可分离为多种单色光,这便是棱镜光谱仪的发轫.光栅光谱仪利用衍射光栅色散率、分辨率高、波长范围宽、在一定范围内光谱呈线性等诸多优势,相较于棱镜光谱仪具有更广泛的应用范围与应用前景.本实验便是调节光栅单色仪的一些参数,并探究它们对于光栅特性的影响,同时利用光栅完成一些光谱的测量.

1.2 实验原理 [1, 2]

光栅光谱仪 光栅是光谱仪中的核心元件,光谱仪的分光功能主要是依靠光栅完成的.光栅的分光原理为多缝 Fraunhofer 衍射,其实质为单个刻划线对光的衍射效应(单缝衍射)与不同刻划线出射光之间的干涉效应(多缝干涉)的叠加,其最终出射光强的分布可如下表达:

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\sin N\beta}{\sin \beta} \right)^2 \quad (1)$$

上式中, I_0 为一常数,表征光自由传播时,即几何像点处的光强, $N = \frac{L}{d}$ 为光栅的周期数,一般有 $N \approx 1 \times 10^4$, $\left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$ 为单缝衍射因子, $\left(\frac{\sin N\beta}{\sin \beta} \right)^2$ 为多缝干涉因子,其中

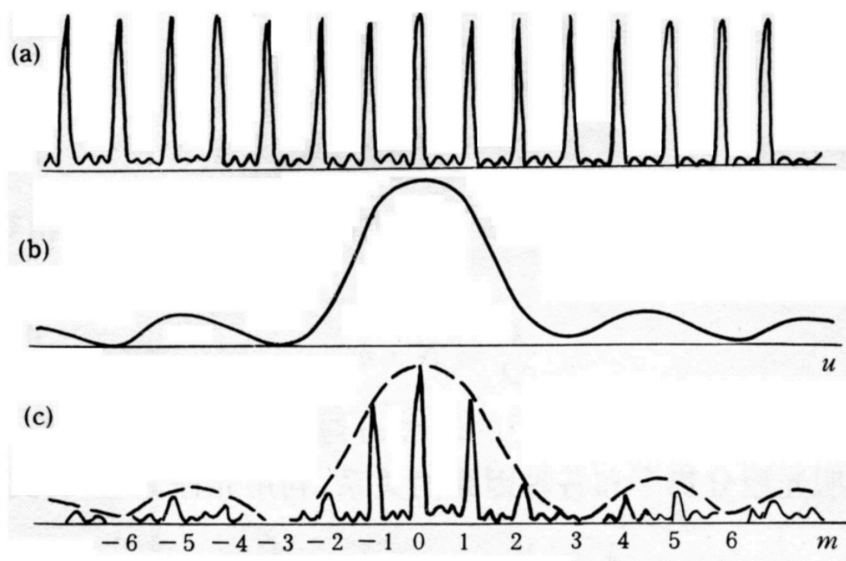


图 1: 衍射光栅光强分布示意图

参数 α, β 定义分别如下:

$$\alpha \triangleq \frac{\pi a (\sin \theta_0 \pm \sin \theta)}{\lambda} \quad (2)$$

$$\beta \triangleq \frac{\pi d (\sin \theta_0 \pm \sin \theta)}{\lambda} \quad (3)$$

其中 a 和 d 分别表示光栅有效部分宽度(单缝宽度)与光栅的空间周期(缝间间距)。由此可见, 各种不同波长的光的出射方向主要由多缝干涉因子决定, 而其强度分布由单缝衍射因子决定。由此也可获得光栅衍射方程, 即一系列主极大的位置时满足 $\sin \beta = 0, \beta = 2n\pi$ 的位置:

$$d(\sin \theta \pm \sin \theta_0) = n\lambda \quad (4)$$

式中, n 即为光谱的级次, 分析易得, 在光栅角位置 θ_0 处会出现光强极小值, 即暗斑; 满足 $N \tan \beta = \tan N\beta$ 时, 出现一系列的次极大位置。

光与介质的吸收曲线 菲涅耳折射反射定律表明, 光在介质表面会同时发生透射与反射, 透射光的一部分往往还会被介质吸收。设 I_0 为入射光强, I_R 为反射光强, I_T 为射入介质中的透射光的光强, I 为在介质中传播了距离 d 后的光强, 则有:

$$R \triangleq \frac{I_R}{I_0} \quad T \triangleq \frac{I}{I_T} \quad (5)$$

式中 R 与 T 分别为光强反射率与透射率, 根据光的线性吸收规律, 有:

$$T = e^{-\alpha d} \quad (6)$$

上式中 α 为一仅仅与介质有关的常数, 称为介质的线性吸收系数。在介质中两个纵向深度不同的位置写出上式子, 取对数并作差可得线性吸收系数的常见测量方案:

$$\alpha = \frac{\ln T_2 - \ln T_1}{d_2 - d_1} \quad (7)$$

介质对光的吸收往往与光的频率有关,这是由于介质吸收光从本质上说是原子吸收光,从而在原子能级之间发生跃迁的过程,量子化条件告诉我们这一过程对光的频率必然有严格的要求,实验上,我们可以测定 α 与光波长 λ 之间的关系曲线,这即为物质的吸收特性曲线.

2 实验仪器与方法

2.1 实验仪器

WDS-8 型组合式多功能光栅光谱仪(焦距 $f = 500\text{ mm}$, 光栅常数 1200 gr/mm , 狭缝宽度在 0 mm to 2 mm 内连续可调,调节精度为 0.01 mm , 光电倍增管调节范围为: $200\text{ nm} - 800\text{ nm}$, CCD 调节范围为 300 nm to 900 nm)、低压钠灯、溴钨灯、红宝石晶体、半导体激光器

2.2 实验方法与步骤

单色仪的定标 定标即以钠元素主线系的双线为标准,校准单色仪可能存在的偏差.具体操作上,应调节光路,使得光线能够较好地进入入射狭缝,测量钠主线系 589.0 nm 和 589.6 nm 双线进行测量,将测量值与标准值进行对比,从而定标.

测量低压钠灯的光谱 调整入射狭缝宽度以及光电倍增管负高压值大小,可以使得单色仪处于一个较好的状态,此时,可测得主线系的 589.0 nm 和 589.60 nm , 锐线系的 615.4 nm 和 616.0 nm 以及漫线系的两对谱线 568.3 nm 和 568.86 nm , 497.78 nm 和 498.2 nm . 由此,便可计算得出钠原子的里德伯常数 R .

红宝石晶体吸收和发射光谱的测量 红宝石晶体对不同波长的入射光吸收不同,吸收系数随入射光波长而变化的关系就是吸收光谱特性. 先将激光器对准红宝石,激发其发射,测定其发射光谱;然后,利用白光光源对准狭缝,分别测定有红宝石吸收和无红宝石吸收时的光谱特性,处理得到红宝石的吸收特性曲线.

3 实验结果

3.1 钠元素光谱测量

主线系 钠主线系波长为 $589.0\text{ nm}/589.6\text{ nm}$, 测量时采用光电倍增管增益为 1, 负高压为 -425 V , 实际测得的两个峰值在 $589.0\text{ nm}/589.6\text{ nm}$, 表明定标是准确的. 实验测得的谱线如图2所示. 对应的峰值高度分别为(相对强度)3921 与 3444, 则对应的分辨率值分别为:

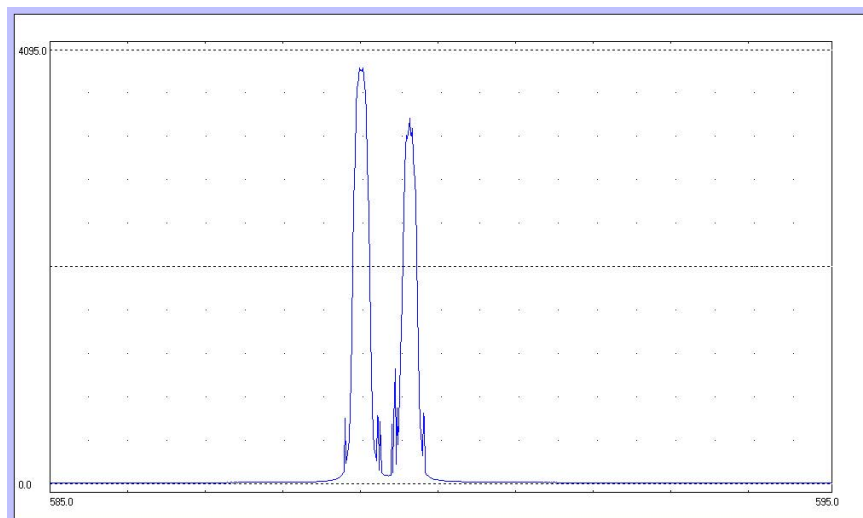


图 2: Na 主线系谱线

$$\begin{aligned} \lambda = 589.0 \text{ nm} \quad R &= \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{589.0}{0.21529} = 2735.84 \\ \lambda = 589.6 \text{ nm} \quad R &= \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{589.6}{0.19893} = 2963.86 \end{aligned} \quad (8)$$

主线系对应的的里德伯常量可如下计算: 双线波长平均值 $\lambda = 589.3 \text{ nm}$, 则据波数公式:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left[\frac{1}{(3 - \Delta s)^2} - \frac{1}{(3 - \Delta p)^2} \right] \quad (9)$$

$$\Rightarrow R^{-1} = \lambda \left[\frac{1}{(3 - \Delta s)^2} - \frac{1}{(3 - \Delta p)^2} \right] \quad (10)$$

$$R = 1.139 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \quad (11)$$

锐线系 钠锐线系波长为 615.4 nm 和 616.0 nm 测量时采用光电倍增管增益为 1, 负高压为 -790 V , 实际测得的两个峰值在 $615.4 \text{ nm}/616.05 \text{ nm}$. 实验测得的谱线如图3所示. 对应的峰值高度分别为(相对强度)2328 与 3530, 则对应的分辨率值分别为:

$$\begin{aligned} \lambda = 615.4 \text{ nm} \quad R &= \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{615.4}{0.18358} = 3319.67 \\ \lambda = 616.0 \text{ nm} \quad R &= \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{616.05}{0.21649} = 2845.63 \end{aligned} \quad (12)$$

锐线系对应的的里德伯常量可如下计算: 双线波长平均值 $\lambda = 615.725 \text{ nm}$, 则据波数公式:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left[\frac{1}{(3 - \Delta p)^2} - \frac{1}{(5 - \Delta s)^2} \right] \quad (13)$$

$$\Rightarrow R^{-1} = \lambda \left[\frac{1}{(3 - \Delta p)^2} - \frac{1}{(5 - \Delta s)^2} \right] \quad (14)$$

$$R = 1.133 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \quad (15)$$

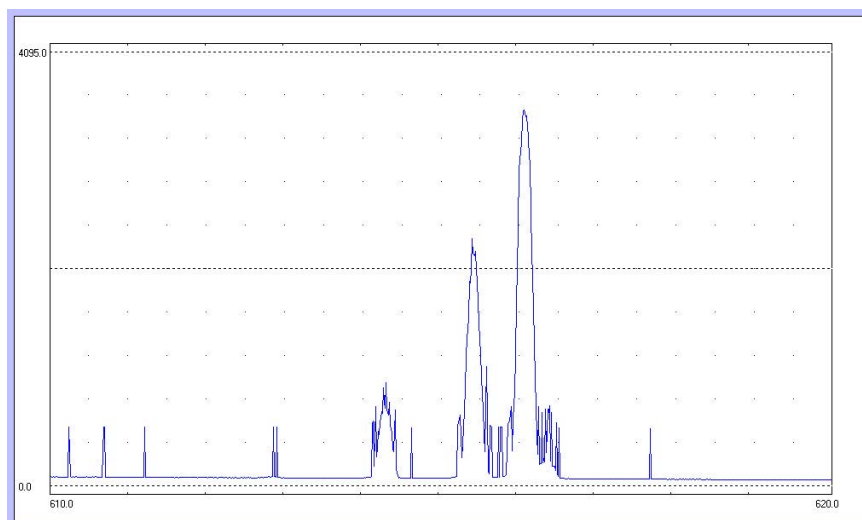


图 3: Na 锐线系谱线

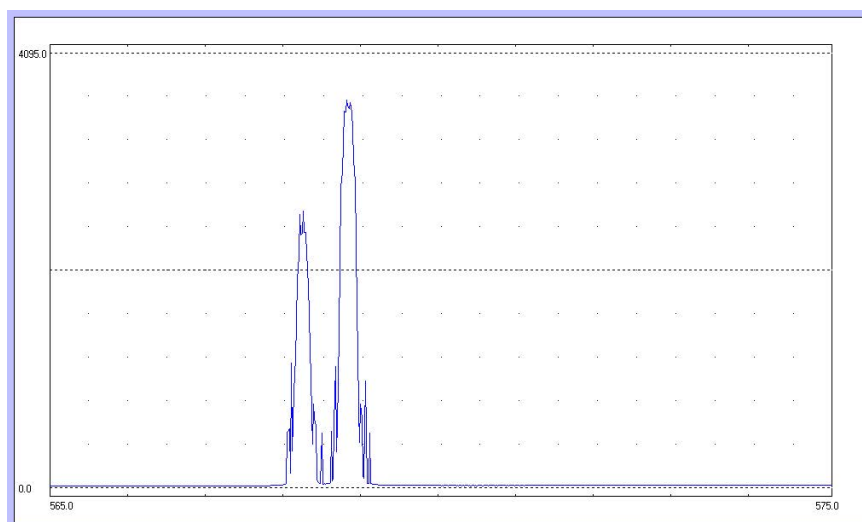


图 4: Na 漫线系第一对谱线

漫线系 漫线系的第一对谱线波长为 568.3 nm/568.86 nm, 测量时采用光电倍增管增益为 1, 负高压为 -717 V, 实际测得的两个峰值在 568.2375 nm/568.8375 nm, 实验测得的谱线如图4所示. 对应的峰值高度分别为(相对强度)2601 与 3625, 则对应的分辨率值分别为:

$$\begin{aligned} \lambda = 568.3 \text{ nm} \quad R &= \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{568.2375}{0.18336} = 3099.03 \\ \lambda = 568.86 \text{ nm} \quad R &= \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{568.8375}{0.21658} = 2626.45 \end{aligned} \quad (16)$$

漫线系的第二对谱线波长为 497.78 nm/498.2 nm, 测量时采用光电倍增管增益为 1, 负高压为 -7846 V, 实际测得的两个峰值在 497.775 nm/498.2 nm, 实验测得的谱线如图5所示. 对应的峰值高度分别为(相对强度)1975 与 3240, 则对应的分辨率值分别为:

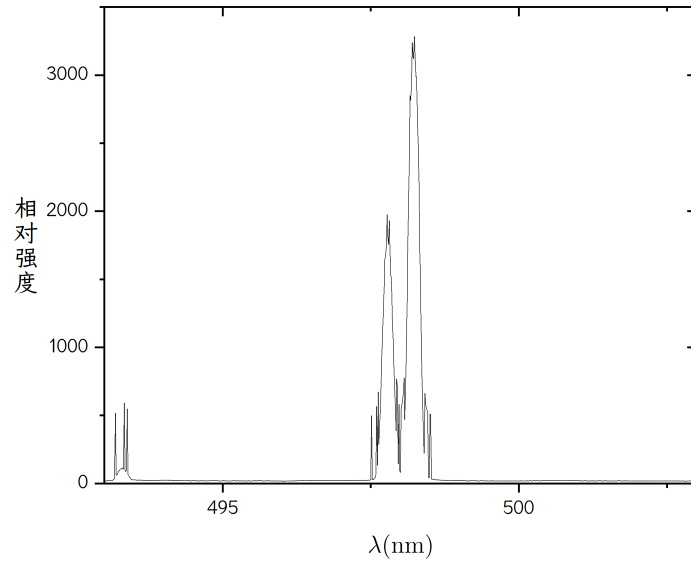


图 5: Na 漫线系第二对谱线

$$\begin{aligned} \lambda = 497.78 \text{ nm} \quad R &= \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{497.775}{0.19021} = 2616.98 \\ \lambda = 498.2 \text{ nm} \quad R &= \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{498.2}{0.21001} = 2372.27 \end{aligned} \quad (17)$$

锐线系对应的的里德伯常量可如下计算：锐线系的波数公式可表为：

$$\frac{1}{\lambda} = R \left[\frac{1}{(3 - \Delta p)^2} - \frac{1}{(n - \Delta d)^2} \right] \quad n = 4, 5 \quad (18)$$

第一对双线波长 ($n = 4$) 平均值 $\lambda = 568.5375 \text{ nm}$, 则据波数公式：

$$\frac{1}{\lambda} = R \left[\frac{1}{(3 - \Delta p)^2} - \frac{1}{(4 - \Delta d)^2} \right] \quad (19)$$

$$\Rightarrow R^{-1} = \lambda \left[\frac{1}{(3 - \Delta p)^2} - \frac{1}{(4 - \Delta d)^2} \right] \quad (20)$$

$$R = 1.131 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \quad (21)$$

第二对双线 ($n = 5$) 波长平均值 $\lambda = 497.9875 \text{ nm}$, 则据波数公式：

$$\frac{1}{\lambda} = R \left[\frac{1}{(3 - \Delta p)^2} - \frac{1}{(5 - \Delta d)^2} \right] \quad (22)$$

$$\Rightarrow R^{-1} = \lambda \left[\frac{1}{(3 - \Delta p)^2} - \frac{1}{(5 - \Delta d)^2} \right] \quad (23)$$

$$R = 1.127 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \quad (24)$$

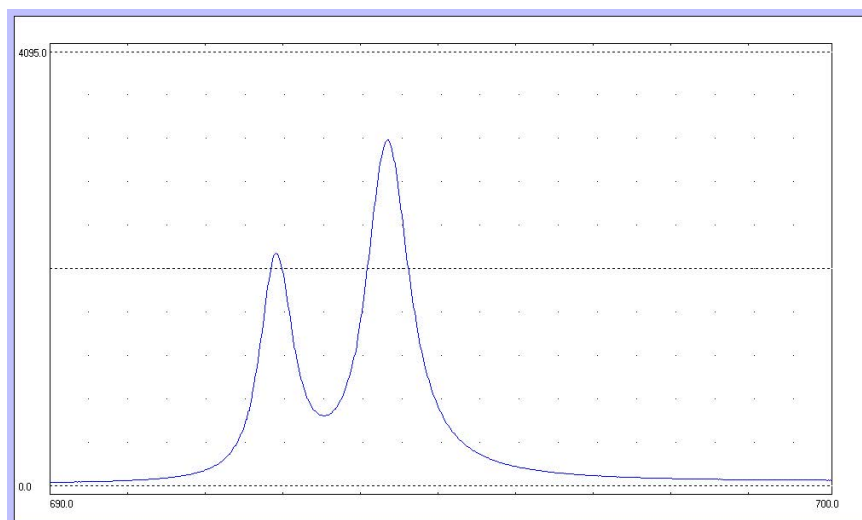


图 6: 红宝石晶体发射谱线

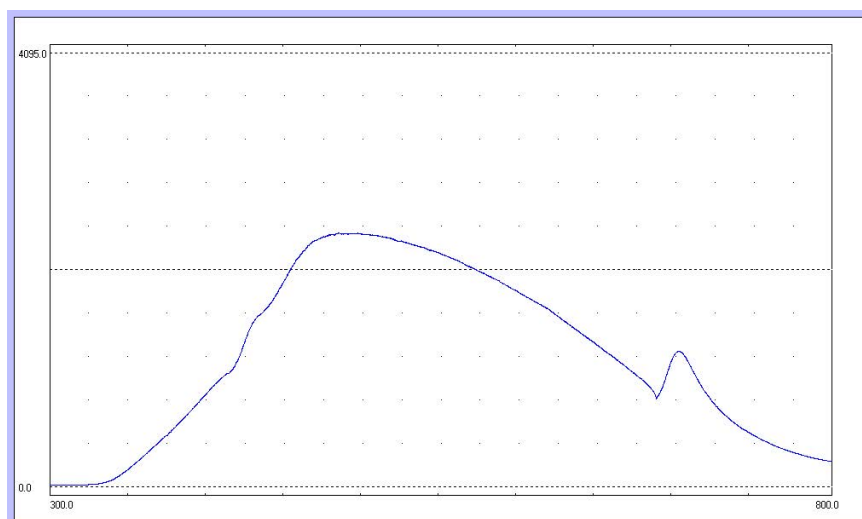


图 7: 红宝石晶体吸收(背景)

3.2 红宝石晶体发射与吸收光谱的测量

实验中光电倍增管增益为 1, 测量发射光谱时的负高压为 -676 V , 测量吸收光谱时的负高压为 -500 V , 测得红宝石晶体的两条发射谱线分别在 692.8875 nm 和 694.325 nm , 考虑仪器可能存在的误差影响, 可以认为这是 Cr^{3+} 离子参与激光作用时 ^2E 向 $^4\text{A}_2$ 自发跃迁时对应的两条强荧光 R_1 和 R_2 线. 发射谱线如图所示红宝石晶体的发射光谱主要是在激光的作用下, 晶格内离子在特定的能级之间跃迁的结果. 由于绝对光强未曾测量, 仅能绘出相对吸收率的光谱, 即相对 $\lg \frac{I_0}{I} - \lambda$ 曲线, 如图9所示. 图中有两个吸收率峰值, 分别在 385 nm 4550 nm 附近, 与理论给出的吸收带相对较为吻合, 分析可知偏差可能主要是由环境背景光强噪声带来的.

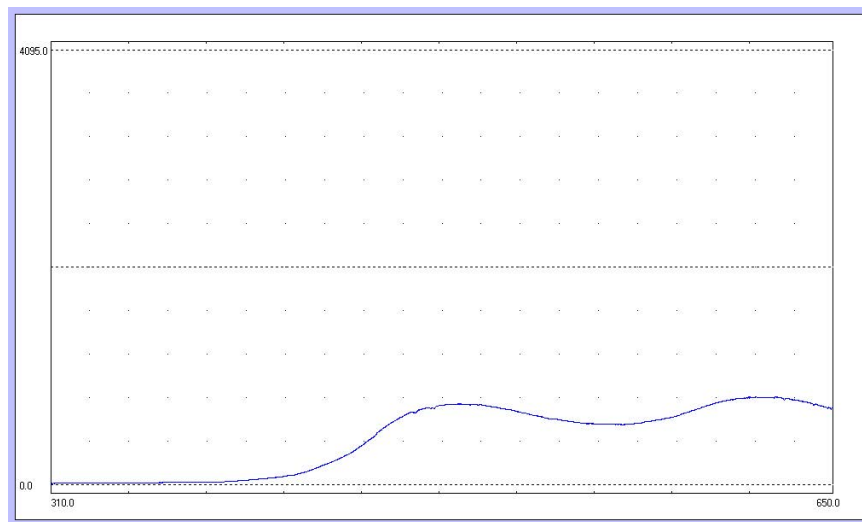


图 8: 红宝石晶体吸收光谱测量

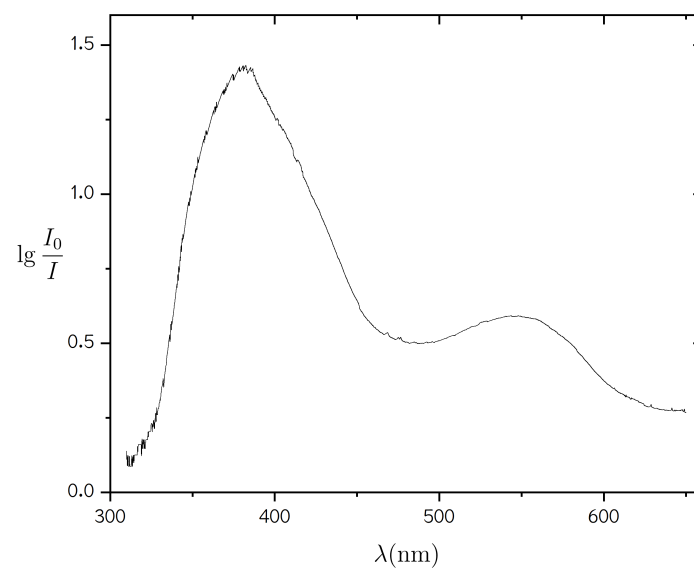


图 9: 红宝石晶体相对吸收率谱图

4 实验讨论(思考题)

4.1 溴钨灯、钠灯与汞灯的区别及其原因

溴钨灯的发光原理为原子中的电子发生电离, 辐射出光子. 由于被电离的电子能量分布是连续谱, 故辐射光子的波长是连续的, 它们非相干叠加形成的最终表象即为白光;

汞灯、钠灯光谱是原子内电子在不同能级间跃迁产生的, 根据原子物理相关知识, 这一跃迁过程只能产生特定频率的光子, 从而产生的是分立谱线; 其中由于钠原子为碱金属原子, 存在轨道贯穿效应带来的精细结构分裂, 故而存在双线结构.

4.2 单色仪理论分辨本领与实际分辨本领的计算 [2]

单色仪的理论分辨本领可如下计算:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (25)$$

由光学知识可知, 衍射光栅零级主极大半角宽度

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{Nd \cos \theta} \quad (26)$$

角色散率

$$D_\theta = \frac{\delta\theta}{\delta\lambda} = \frac{j}{d \cos \theta_j} \quad (27)$$

Rayleigh 判据给出:

$$\delta\theta = \Delta\theta \quad (28)$$

则最小可分辨波长为:

$$\delta\lambda = \frac{\delta\theta}{D_\theta} = \frac{\lambda}{jN} \quad (29)$$

从而理论分辨本领:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = jN \quad (30)$$

实际测量时, 使用 Rayleigh 判据, 分辨本领可如下计算:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (31)$$

其中 $\Delta\lambda$ 是半高宽度.

4.3 比较单色仪的理论与实际分辨本领

本实验中光栅的理论分辨本领应为 1×10^4 量级, 与实际分辨本领差别较大, 主要原因有:

- 理论推导中采用了许多近似, 它们在实际实验中不一定成立;
- 理论推导中使用的是理想光栅, 并未考虑实际它可能存在的球差、像差等成像偏差带来的误差;
- 光电倍增管本身读数的误差、环境光不稳定带来的噪声都有可能影响实验测量结果.

5 总结与致谢

本实验主要完成了利用钠原子主线系的第一条谱线对光栅单色仪的定标工作, 并利用它测定了钠原子的多条精细结构光谱, 以及红宝石晶体的发射与吸收光谱, 实验结果与理论差异在误差允许的范围之内. 实验过程中, 尤其感谢助教沙甜甜学姐对我的倾力指导与帮助!

参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 单色仪定标与光谱测量(实验讲义). 2024.03.
- [2] 赵凯华, 钟锡华编著. 光学(重排本). 北京大学出版社. 2017. pp. 253-275.