

单色仪的定标与使用 实验报告

(中国科学技术大学 李若贤 安徽合肥 230000)

指导老师: 黄晨宇

摘要 本文通过对光栅单色仪的定标及使用, 得到了部分低压钠灯的光谱, 测量了红宝石的吸收和发射谱线, 还测得了红、绿、蓝三种滤光片的吸收曲线, 对其吸收性能做了分析.

关键词 光栅单色仪 钠原子光谱 红宝石光谱 滤光片性能

1. 引言 [1]

单色仪是提取复色光中极窄带宽单色光的关键仪器. 相较于棱镜单色仪, 光栅单色仪具有线性度好, 分辨率高及波长范围广等显著优点. 本实验通过对单色仪的定标与多种光谱的测量, 进行钠原子光谱, 红宝石光谱和滤光片吸收光谱等多种测量, 并对结果进行分析和讨论.

2. 实验仪器与原理

2.1 实验仪器

WDS-8 型组合式多功能光栅光谱仪, 具体参数: 焦距 $f=500 \text{ mm}$. 光栅条数: 1200 gr/mm. 狹缝宽度在 0-2 mm 连续可调, 示值精度 0.01 mm. 光电倍增管的测量范围: 200-800 nm; CCD 的测量范围: 300-900 nm.

2.2 实验原理 [1]

2.2.1 光栅单色仪 [2]

光栅单色仪的核心是衍射光栅. 其利用多缝夫琅禾费衍射实现分光. 其出射光强分布 I 是单缝衍射因子与多缝干涉因子的叠加:

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

其中

$$\alpha = \frac{\pi a (\sin \theta_0 \pm \sin \theta)}{\lambda}, \beta = \frac{\pi d (\sin \theta_0 \pm \sin \theta)}{\lambda}$$

当满足光栅方程时, 出现主极大光谱线:

$$d(\sin \theta \pm \sin \theta_0) = m\lambda$$

式中 d 为光栅常数, m 为衍射级次, θ_0 为入射角, θ 为衍射角.

为了优化测量性能, 单色仪常采用闪耀光栅. 闪耀光栅通过特殊设计的锯齿状槽面, 可以将单缝衍射因子的中央主极大平移到特定的多缝干涉级次上. 这种设计能显著提高特定波长范围内的衍射效率, 从而有效提升实验测量的信噪比.

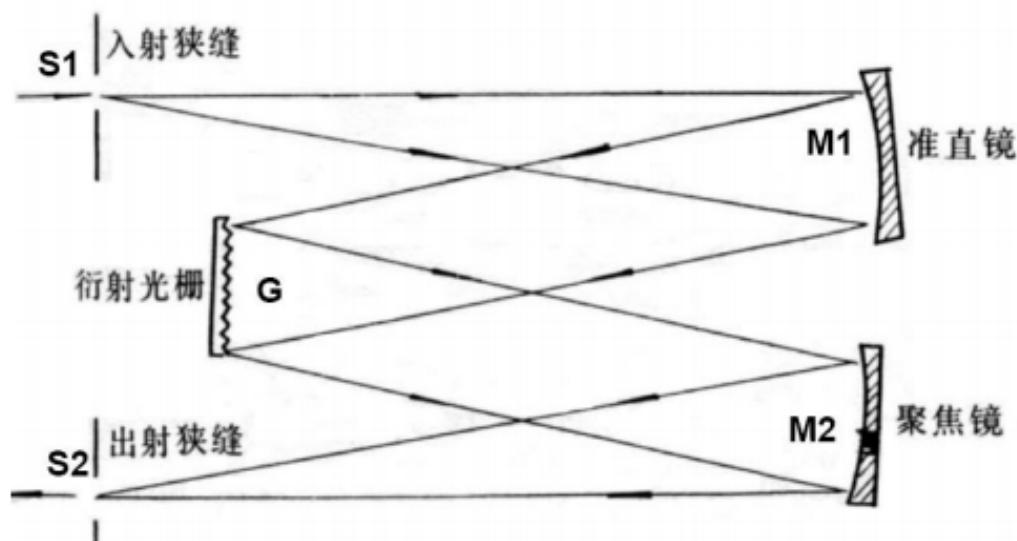


图 1 光栅单色仪的工作原理

光源或照明系统发出的光束均匀地照亮在入射狭缝 S1 上, S1 位于离轴抛物镜的焦平面上, 光通过 M1 变成平行光照射到光栅上, 再经过光栅衍射返回到 M1, 经过 M2 会聚到出射狭缝 S2, 由于光栅的分光作用, 从 S2 出射的光为单色光. 当光栅转动时, 从 S2 出射的光由短波到长波依次出现. S2 出射狭缝位置连接信号接收设备(光电倍增管/CCD), 可对出射光谱进行数据采集分析.

2.2.2 物质对光的吸收

当一束波长为 λ 的单色平行光垂直入射到厚度为 d 的介质平板上时, 光强从 I_0 减弱为 I . 根据线性吸收规律, 透射率 T 与线性吸收系数 α 满足:

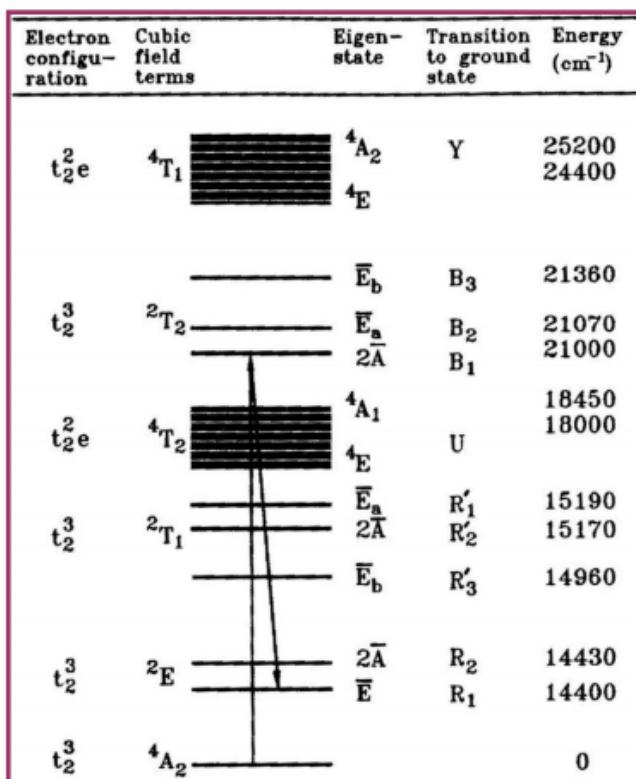
$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\alpha d}$$

对于同一材料但厚度不同的两块试样 (厚度分别为 d_1 和 d_2), 其线性吸收系数可表示为:

$$\alpha = \frac{\ln T_1 - \ln T_2}{d_2 - d_1}$$

2.2.3 红宝石的发射光谱

红宝石是掺有少量三价铬离子 (Cr^{3+}) 的 Al_2O_3 单晶. 其能级跃迁产生的光谱反映了 Cr^{3+} 离子在 3d 壳层上电子组态的变化. 在激光激发下, 电子从基态 ${}^4\text{A}_2$ 跃迁至吸收带, 随后经过非辐射跃迁到达亚稳态 ${}^2\text{E}$. 最终, 电子从亚稳态自发辐射回到基态, 产生 R_1 (694.3 nm) 和 R_2 (692.8 nm) 两条强荧光线.

图 2 Cr^{3+} 离子参与激光作用的能级结构

3.实验过程

3.1 光栅单色仪的定标

开启低压钠灯, 调节准直透镜使光束均匀照亮单色仪的入射狭缝. 设定扫描范围包含钠双线 (589.0 nm 和 589.6 nm), 调节负高压和狭缝宽度, 寻找合适的信噪比. 记录实验测量峰值, 对比理论值进行定标.

3.2 测量低压钠灯的光谱

调节狭缝宽度以平衡光强与分辨率. 在仪器定标准确的基础上, 扫描并获取钠原子的各线条光谱. 测量主线系 (589.0 / 589.6 nm), 锐线系 (615.4 / 616.0 nm) 及漫线系 (568.3 / 568.86 nm 等) 的精细结构. 导出光谱数据, 利用各谱线的波数差计算钠的里德伯常数 R .

3.3 红宝石晶体的发射和吸收光谱测量

发射光谱测量: 利用 532 nm 半导体激光器作为激发光源对准红宝石晶体. 通过单色仪捕获其荧光, 记录 R_1 与 R_2 线的位置与强度. 吸收光谱测量: 换用溴钨灯 (白光光源). 先测定白光的背景光谱曲线 $I_0(\lambda)$, 然后在光路中插入红宝石晶体, 测得透过光谱 $I(\lambda)$. 计算吸收比 $\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$, 绘制相对吸收率随波长的变化曲线.

3.4 滤光片的吸收曲线测量

使用溴钨灯作为连续光源. 首先测量并记录通过空气 (参考背景) 的光谱强度 I_0 . 在入射狭缝前插入待测滤光片, 在相同负高压条件下测量其透射光谱 I , 绘制吸收曲线并分析其性能.

4.实验结果与讨论

4.1 光栅单色仪的定标

调整负高压为-521V, 在[585.0nm, 595.0nm]范围内扫描得到钠双线, 与理论对比定标后, 得到的结果如图所示:

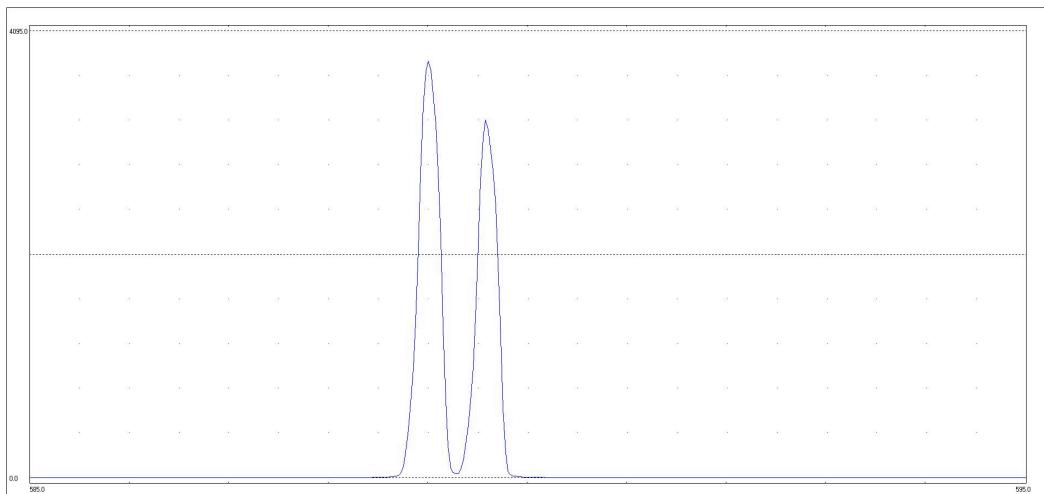


图 3 使用钠双线定标

谱线序号	1	2
峰值对应的波长(nm)	589.00	589.58
理论值(nm)	589.0	589.6
峰值的相对强度	3817.0	3273.0

表 1 钠双线定标

4.2 测量低压钠灯的光谱 [3]

在钠的锐线系, 两个漫线系附近扫描, 得到的结果如下:

4.2.1 锐线系

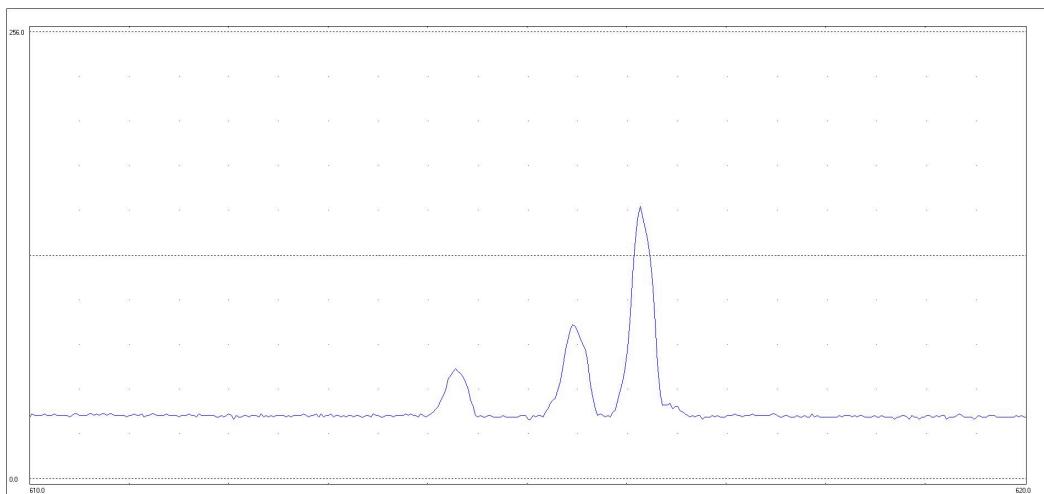


图 4 锐线系

锐线系扫描图中左侧有一个多余的较小的峰, 这可能是光源不纯净或环境光源的影响导致的. 取右侧的两个峰:

谱线序号	1	2
峰值对应的波长(nm)	615.45	616.13
理论值(nm)	615.4	616.0
峰值的相对强度	88.00	156.00

表 2 锐线系光谱

图中锐线系是钠原子 $5s \rightarrow 3p$ 跃迁的铺线, 测量得到的平均波长 $\lambda = 615.79\text{nm}$, 由波数的公式

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{(3 - \Delta_p)^2} - \frac{R}{(5 - \Delta_s)^2}$$

可以求出里德伯常数

$$R = 1.0980 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

其中 $\Delta_p = 0.883$, $\Delta_s = 1.354$ 是 $3p$ 和 $5s$ 轨道的量子数亏损.

4.2.2 漫线系

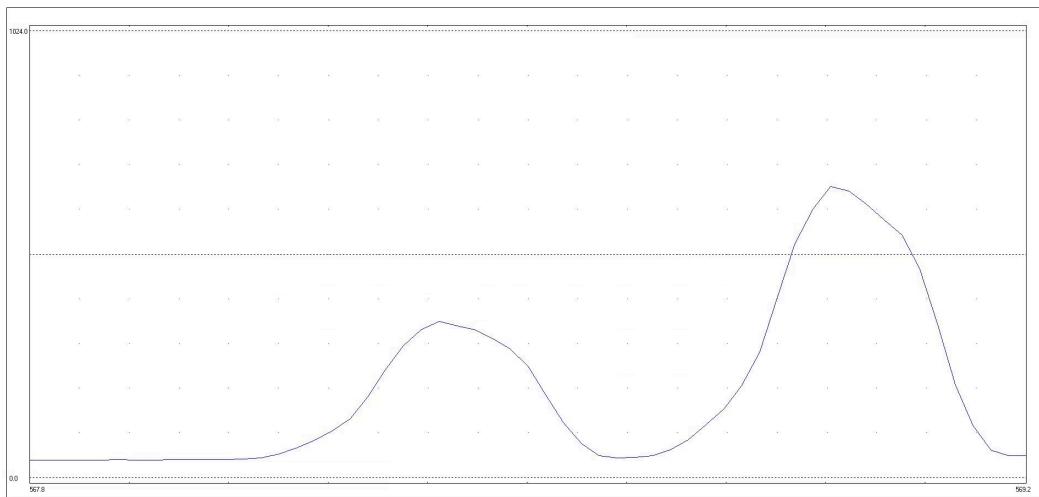


图 5 漫线系 568nm 附近

谱线序号	1	2
峰值对应的波长(nm)	568.38	568.93
理论值(nm)	568.3	568.86
峰值的相对强度	358.00	666.00

表 3 漫线系 568nm 附近光谱

图中 568nm 附近漫线系是钠原子 $4d \rightarrow 3p$ 跃迁的铺线, 测量得到的平均波长 $\lambda = 568.66\text{nm}$, 由波数的公式

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{(3 - \Delta_p)^2} - \frac{R}{(4 - \Delta_d)^2}$$

可以求出里德伯常数

$$R = 1.0976 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

其中 $\Delta_p = 0.883, \Delta_d = 0.0134$ 是 3p 和 4d 轨道的量子数亏损.

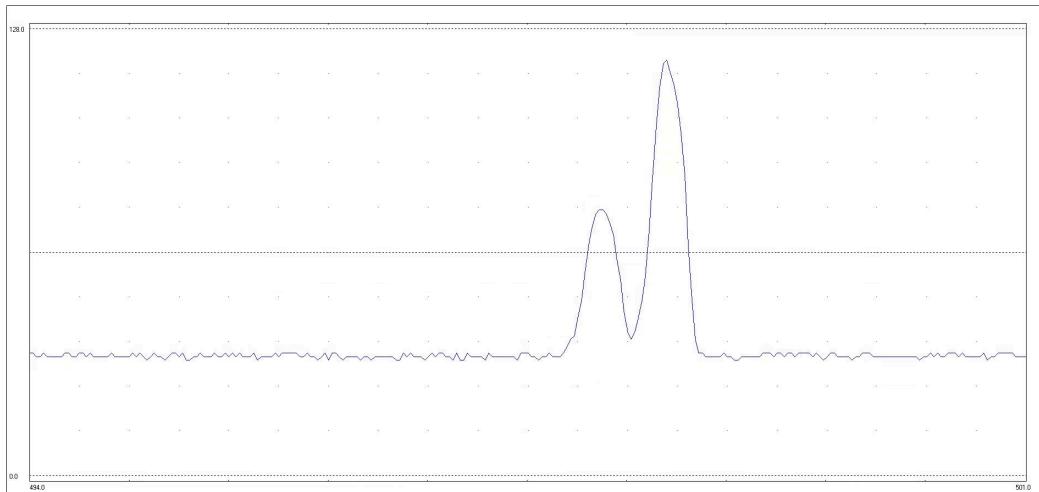


图 6 漫线系 497nm 附近

谱线序号	1	2
峰值对应的波长(nm)	498.03	498.48
理论值(nm)	497.78	498.2
峰值的相对强度	358.00	119.00

表 4 漫线系 497nm 附近光谱

图中 497nm 附近漫线系是钠原子 5d→3p 跃迁的铺线, 测量得到的平均波长 $\lambda = 498.26 \text{ nm}$, 由波数的公式

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{(3 - \Delta_p)^2} - \frac{R}{(4 - \Delta'_d)^2}$$

可以求出里德伯常数

$$R = 1.0973 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

其中 $\Delta_p = 0.883, \Delta'_d = 0.0145$ 是 3p 和 5d 轨道的量子数亏损.

4.3 红宝石晶体的发射和吸收光谱测量

4.3.1 发射光谱

测得的红宝石发射光谱及峰值的数据如图所示:

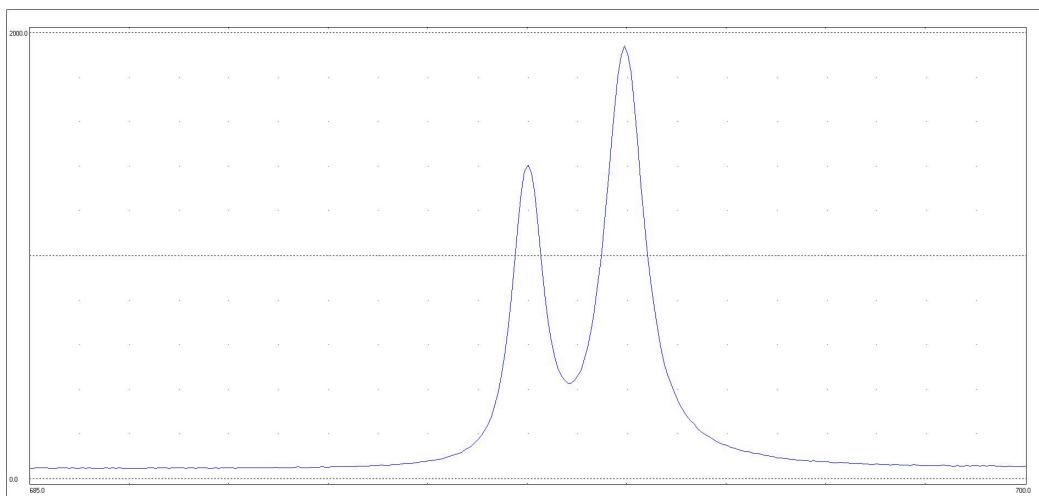


图 7 红宝石发射光谱

谱线序号	1	2
峰值对应的波长(nm)	692.50	693.95
理论值(nm)	692.8	694.3
峰值的相对强度	1404.0	1940.0

表 5 红宝石发射光谱

红宝石发射光谱的机制在 2.2.2 中已经分析过, 两个峰对应 Cr^{3+} 离子从亚稳态跃迁到基态的两条谱线 R_1 (694.3 nm) 和 R_2 (692.8 nm), 实验值位于理论值附近, 可以认为贴合较好.

红宝石晶体发光由于其能量集中, 穿透性强的特点, 主要应用于制作固体激光器核心介质, 激光医疗与工业加工等领域. 也可以用于荧光压力传感器, 光谱标定等精密测量领域.

4.3.2 吸收光谱

测得的红宝石吸收光谱和背景光谱如图所示:

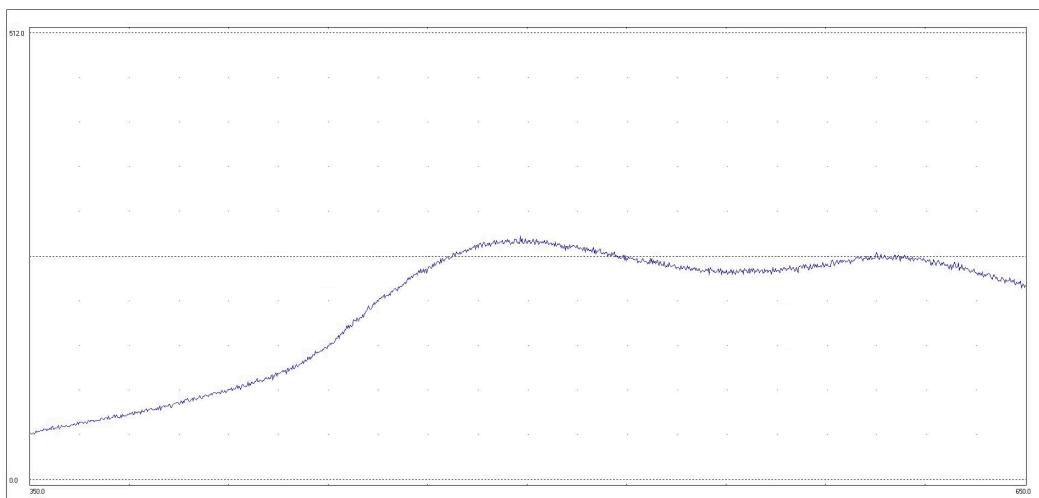


图 8 红宝石吸收光谱

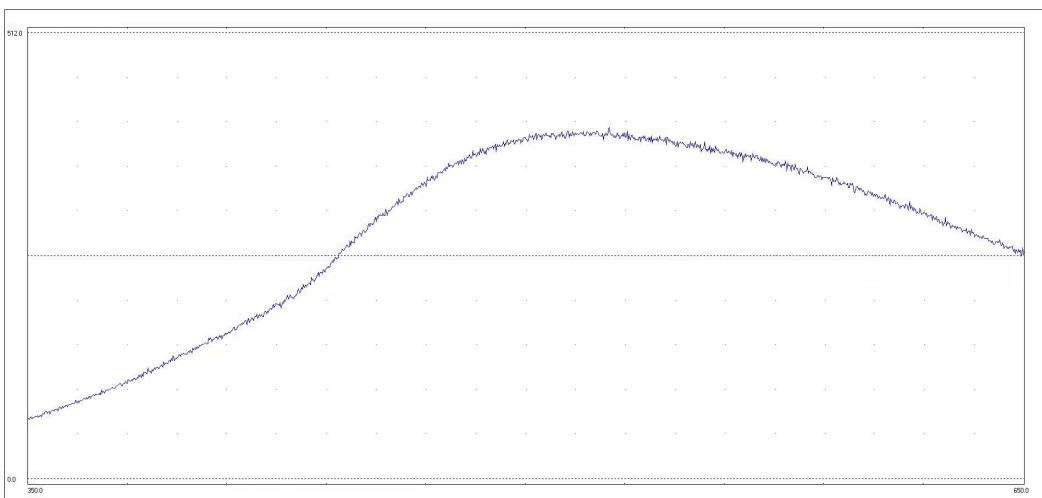


图 9 背景光谱

设 I_0 和 I 分别是吸收前和吸收后的光强, 则以 $\ln(I_0/I)$ 为纵轴, 波长 λ 为横轴作图, 可以得到红宝石的吸收率曲线:

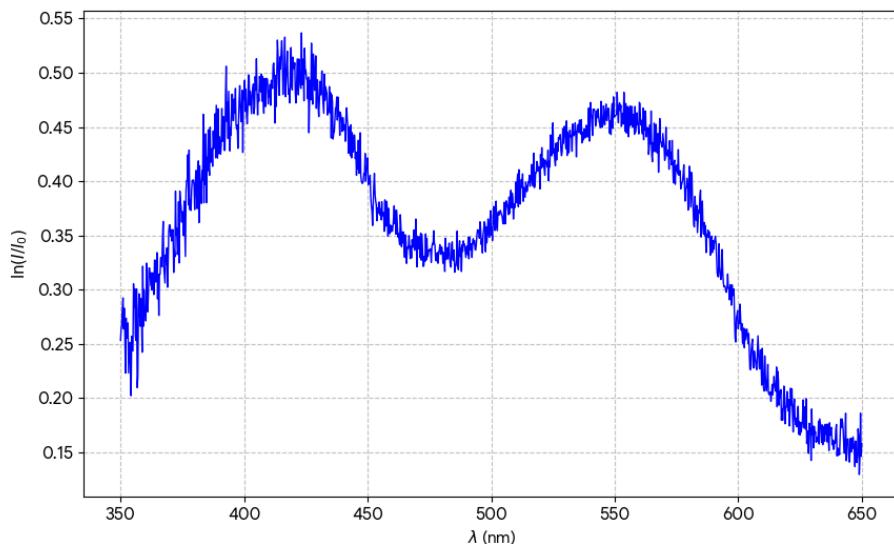


图 10 红宝石的吸收率曲线

可以看到, 图中吸收率大致有两个峰值, 分别位于 420 nm 和 550 nm 附近, 与理论 Cr^{3+} 的 410 nm, 550 nm 两个吸收峰符合较好, 对应 $^4\text{F}_1$ 和 $^4\text{F}_2$ 的跃迁.

4.4 滤光片的吸收曲线测量

实验测得的背景光谱和加入红, 蓝, 绿三种滤光片后的光谱如图所示:

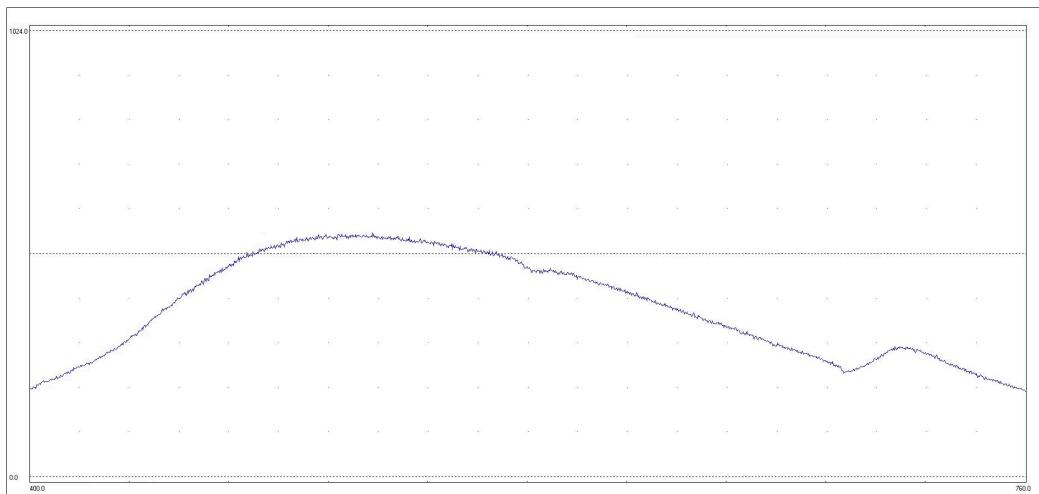


图 11 背景光谱

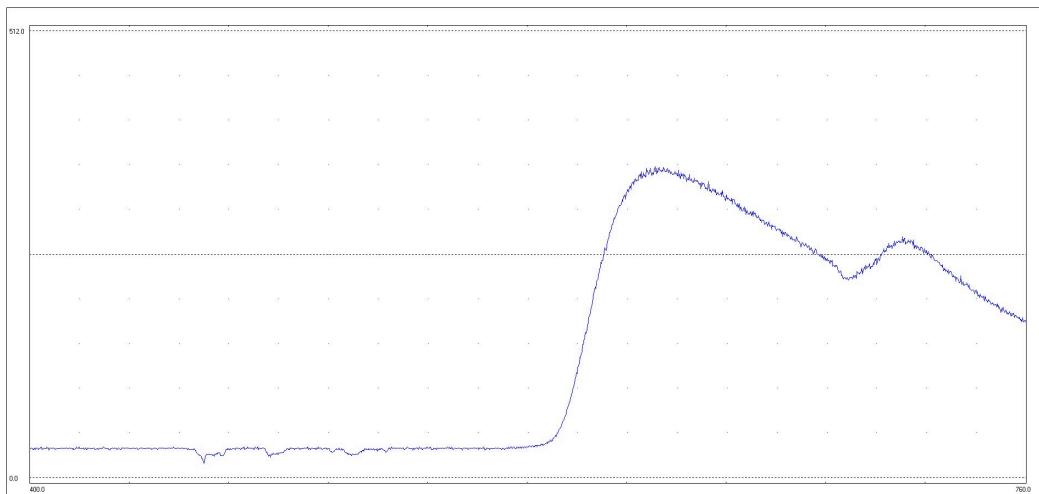


图 12 加入红滤光片

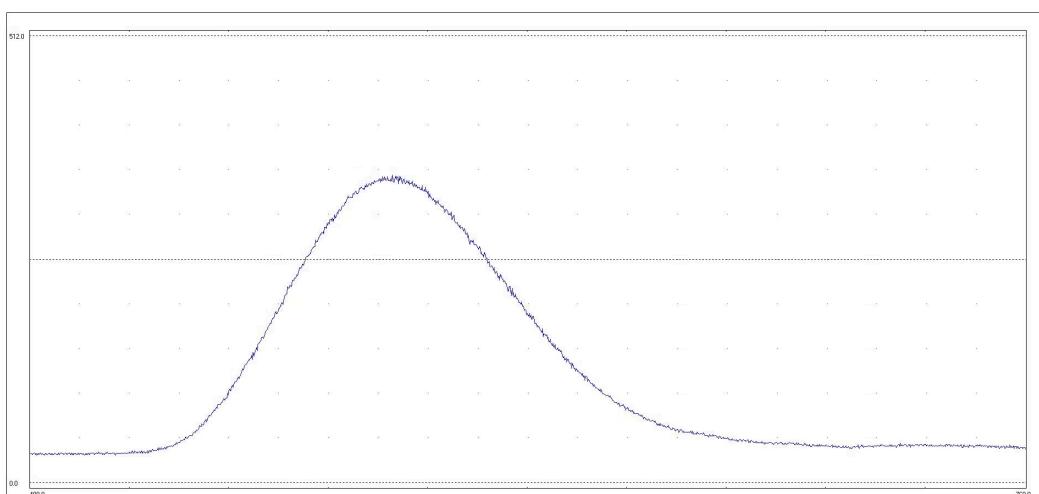


图 13 加入绿滤光片

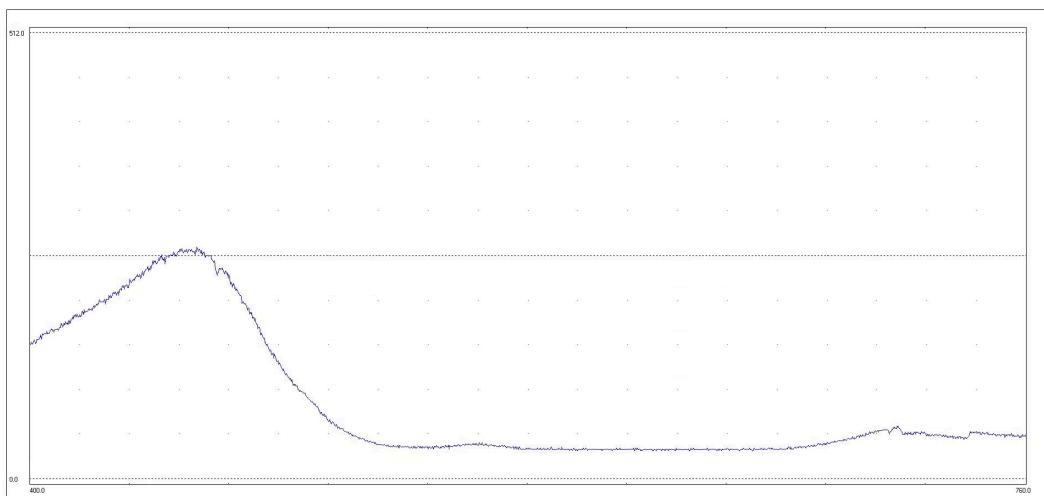


图 14 加入蓝滤光片

同理, 以 $\ln(I_0/I)$ 为纵轴, 波长 λ 为横轴作图, 可以得到滤光片的吸收率曲线:

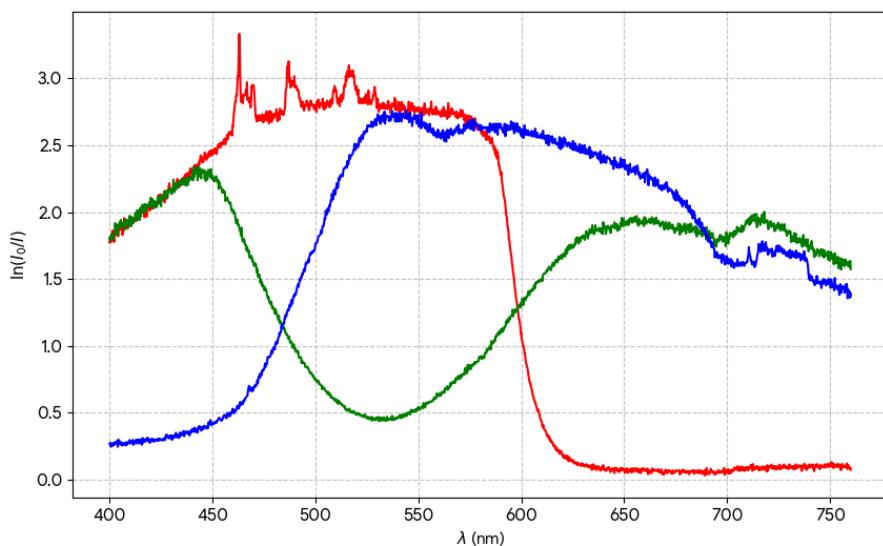


图 15 滤光片吸收率曲线

可以看出, 红滤光片在短波长区域(蓝绿光区)具有极高的吸收值, 而在 600 nm 以上的红光区吸收极低, 表现出良好的红光透射性能;

绿滤光片在 500 nm 至 570 nm 附近的吸收曲线出现明显下凹(吸收极小值), 表明其主要透过绿光, 而对红光和蓝紫光均有较强的吸收.

蓝滤光片在短波长(400 nm - 480 nm)吸收较低, 即主要透过蓝光, 随波长增大吸收迅速升高, 能有效吸收中长波长的光.

5.思考题

1.如何求出入射狭缝的最佳宽度?

入射狭缝的宽度受到多种因素相互影响. 如果入射狭缝过窄, 光强将显著减弱, 且衍射效应将逐渐明显; 如果狭缝过宽, 狹缝几何像宽度就会变大, 外界环境的干扰也会增大, 仪器的分辨能力就会下降.

所以, 狹缝的最佳宽度应该是二者平衡时的宽度, 需要根据实验来调整., 一般在 0.1mm 左右.

2. 单色仪的理论分辨本领如何计算? 怎样测量单色仪的实际分辨本领?

单色仪的理论分辨本领由公式给出:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = Nm$$

式中 N 为光栅总刻线数, m 为衍射级次.

在实验中, 可以使用软件计算谱线峰值的半高全宽 $\Delta\lambda$, 然后代入公式 $R = \lambda/\Delta\lambda$ 求出实际的分辨率.

3. 比较单色仪的理论分辨本领和实际分辨本领, 说明两者差别大的原因

正常情况下, 理论分辨率应该较大, 约为 10^4 量级, 然而实验中的分辨率显然远小于这一数据. 可能的原因:

理论推导是在理想光栅, 无像差等近似下进行的, 实验中存在环境光的误差, 仪器本身的误差等诸多影响因素, 难以完全与理论相符.

4. 解释光电倍增管的工作原理, 为什么随着负高压的绝对值越大, 采集的灵敏度会显著提高?

光电倍增管的工作原理:

1. 光电发射: 入射光子撞击光阴极, 根据光电效应激发出初级光电子
2. 二次发射倍增: 初级电子在倍增级间的电场作用下被加速, 撞击下一级极板并激发出数量更多的二次电子, 经过多级倍增后, 信号电流可放大 10^5 至 10^8 倍

灵敏度随着电压增大的原因: 负高压绝对值越大, 电子获得的动能就更高, 撞击时产生的二次电子显著增加, 于是灵敏度(总增益)会指数级提升.

5. 说明溴钨灯、钠灯和汞灯的光谱的区别和道理

溴钨灯是通过原子中的电子发生电离辐射光子的, 电离电子能量分布是连续的, 所以辐射光子的波长是连续谱, 叠加成白光.

钠灯, 梅灯是电子在不同能级跃迁产生光子, 于是产生的是分立的谱线, 还可能存在精细结构.

6. 总结

本实验通过光栅单色仪完成了定标及一系列光谱测量, 利用钠原子主线系的双线结构校准了单色仪的波长偏差, 在此基础上, 通过对钠原子不同能级跃迁产生的分立谱线进行测量, 计算得出里德伯常数, 与理论值吻合良好. 此外, 实验深入探究了红宝石晶体在激光激发下的 R_1 与 R_2 强荧光线发射特性, 并绘制了其在 4A_2 到吸收带跃迁过程中的吸收曲线. 最后通过对红, 绿, 蓝三种滤光片吸收特性的测定. 整个实验有力地证明了光栅单色仪在精密光谱定性与定量分析领域具有极高的应用价值和有效性.

参考文献

- [1] 张华洋, 大学物理 单色仪的定标与使用 实验讲义.
- [2] 赵凯华, 钟锡华, 光学(重排本). 北京大学出版社.
- [3] 徐克尊, 陈向军, 陈宏芳, 近代物理学. 中国科学技术大学出版社.