

单色仪定标和光谱测量实验报告

姓名：张积翔 学号：PB23020595

摘要：

本实验使用光栅光谱仪，首先低压钠灯的已知的主线系双光谱线波长对光栅单色仪进行定标，并测量了低压钠灯的主线系、锐线系、漫线系光谱，计算得到钠原子的里德伯常数为 $R = 1.0978 \times 10^7 m^{-1}$ ，然后测量了红宝石晶体的发射和吸收光谱，并分析其发光原理与应用，最后测量了蓝色和绿色滤光片的吸收曲线并分析其性能和吸光特性。

关键词：单色仪；光谱测量；里德伯常数；红宝石晶体；滤光片

1. 引言

光谱测量技术是现代物理实验中研究物质结构和光与物质相互作用的重要手段之一。光栅光谱仪是利用衍射作为光学元件用光栅衍射的方法获得单色光的仪器，光栅光谱仪具有比棱镜单色仪更高的分辨率和色散率。衍射光栅的可以工作于从数十埃到数百微米的整个光学波段，比色散棱镜的工作波长范围宽。单色仪作为实现高精度光谱分辨的核心仪器，能够从复色光中选取特定波长的单色光，因此广泛应用于元素分析、吸收谱和发射谱的测量等领域。

本实验旨在通过对光栅单色仪的结构与原理的深入理解，掌握其基本使用方法，并完成对其波长刻度的定标。在此基础上，利用已知谱线对单色仪进行波长校准，以确保测量的准确性和可靠性。随后通过测量红宝石晶体、稀土化合物、滤波片及染料溶液等样品的吸收与发射光谱，进一步加深对物质光谱特性的理解。实验不仅锻炼了调节光路与操作光谱仪器的能力，也为后续开展精密光谱分析和原子能级研究奠定了实践基础。

2. 实验原理^[1]

2.1 光栅单色仪的基本原理

单色仪是一种利用光的色散效应从复色光中提取单色光的仪器，其核心元件为光栅。光栅由规则刻划的反射或透射刻线组成，在满足衍射条件时，不同波长的光会以不同的角度衍射开来。光栅的基本衍射公式为：

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

式中, θ_0 为入射角, θ_m 为衍射角, d 为光栅常数, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, 称为衍射级次。式中正负号的使用规定是: 当 θ_0 和 θ_m 在光栅法线同侧时, 取正号, 反之, 则取负号。该公式表明, 不同波长的光将在不同方向上产生衍射。光栅通过上述机制将不同波长的光分散开来 (即角色散), 从而实现分光功能。

2.2 吸收曲线测量原理

当一束光入射到有一定厚度的介质平板上时, 有一部分光被反射, 另一部分光被介质吸收, 剩下的光从介质板透射出来。通常, 介质对光的反射, 折射和吸收不但与介质有关, 而且与入射光的波长有关。光谱透射率 T_i 与波长 λ 的关系曲线称为透射曲线。在介质内部 (假定介质内部无散射), 光谱透射率 T_i 与介质厚度 d 有如下关系:

$$T_i = e^{-\alpha d}$$

式中, α 称为介质的线性吸收系数, 一般也称为吸收系数。吸收系数不仅与介质有关, 而且与入射光的波长有关。吸收系数 α 与波长 λ 的关系曲线称为吸收曲线。

3. 实验仪器

光栅光谱仪 (单色仪) 是一个光谱分析研究的通用设备, 其元件主要包括: 光栅及反射镜, 准光镜和物镜, 入射出射狭缝旋钮, 信号接收设备 (光电倍增管/CCD), 计算机及软件系统, 图 1 给出了典型光栅单色仪的结构图。

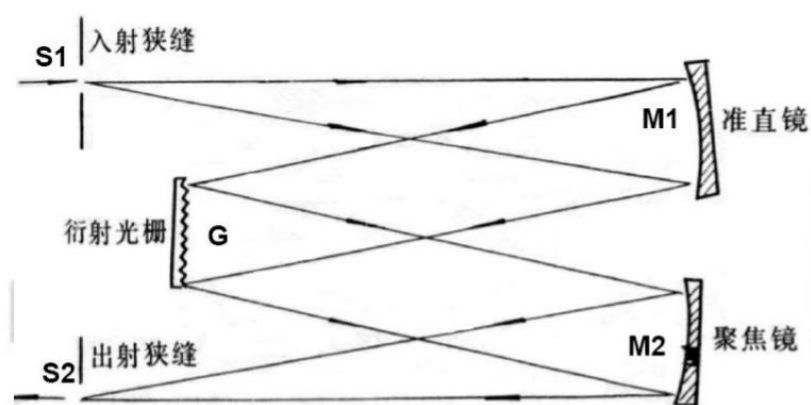


图 1: 光栅单色仪结构和原理

如图 1, 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。如果 S2 出射狭缝位置连接信号接收设备(光电倍增管/CCD), 则可对出射光谱进行数据采集分析。

本实验使用的仪器: 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 。狭缝宽度在 $0-2\text{ mm}$ 连续可调, 示值精度 0.01mm 。光电倍增管的测量范围: $200-800\text{nm}$; CCD 的测量范围: $300-900\text{nm}$ 。

4. 实验内容

4.1 光栅单色仪定标

设计和调整光路把低压钠灯的光导入入射狭缝, 测量时须找出合适的负高压值, 并利用采集程序设定合理的测量范围获取双光谱线(钠灯)完全分离开的光谱曲线。根据钠的主线系已知波长为 589.0nm 和 589.6nm 对单色仪定标, 并记录负高压值和保存光谱曲线。

4.2 测量低压钠灯光谱

钠原子光谱一般可观察到四个线系: 主线系、漫线系、锐线系、基线系。由同一谱线波数差即可得到钠的里德伯常数。在仪器调整较好的情况下可测得主线系的 589.0nm 和 589.6nm , 锐线系的 616.0nm 和 615.4nm 以及漫线系的两对谱线 568.3nm 和 568.86nm , 497.78nm 和 498.2nm 。

4.3 红宝石晶体的发射和吸收光谱测量

使用溴钨灯($360-2500\text{nm}$)作为光源。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。设计和调整光路, 并选取合理的负高压值, 测量出红宝石的发射光谱和吸收光谱, 并分析红宝石晶体的发光原理以及应用。

4.4 滤光片吸收曲线测量

使用溴钨灯($360-2500\text{nm}$)作为光源。设计和调整光路, 并在光路中插入滤光片, 选取合适的负高压值, 测量其吸收曲线, 并分析滤光片的性能和吸光特性。

5. 实验结果

5.1 光栅单色仪定标

利用低压钠灯的主线系光谱峰值应为 589.0nm 和 589.6nm 进行定标, 实验测得钠主线系光谱如下:

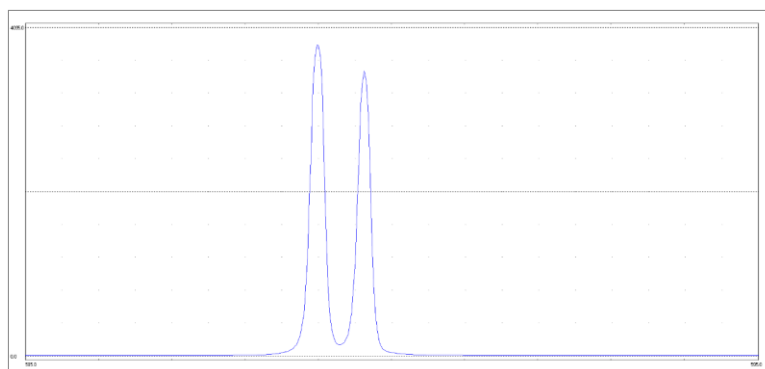


图 2：钠的主线系

5.2 测量低压钠灯的光谱

钠的主线系光谱如图 2 所示，两个峰对应的波长分别为 589.00nm 和 589.63nm。根据钠的主线系里德伯公式

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

对波长取平均 $\lambda = 589.31\text{nm}$ ，又 $\Delta_s = 1.373$, $\Delta_p = 0.883$ ，计算得到钠的里德伯常数为 $R = 1.0973 \times 10^7 \text{m}^{-1}$ 。

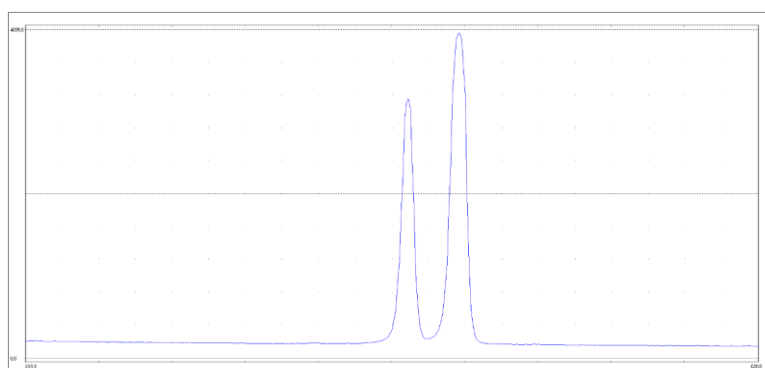


图 3：钠的锐线系

钠锐线系两个峰所对应波长分别为 615.23nm 和 615.93nm。根据钠的锐线系里德伯公式

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

对波长取平均 $\lambda = 615.58\text{nm}$ ，又 $\Delta_p = 0.883$, $\Delta_s = 1.354$ ，计算得到钠的里德伯常数为 $R = 1.0983 \times 10^7 \text{m}^{-1}$ 。

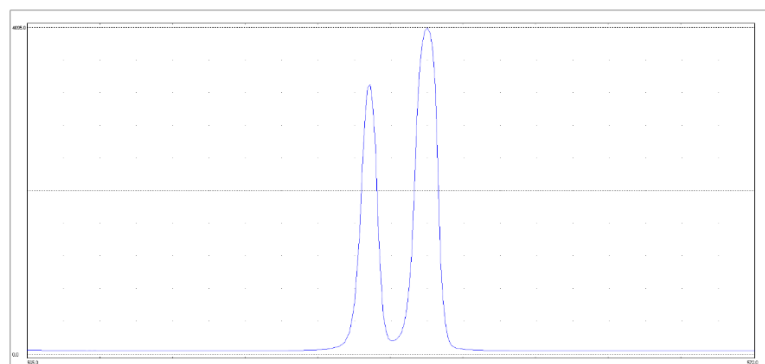


图 4: 钠的漫线系 1

钠第一支漫线系两个峰所对应波长分别为 568.30nm 和 568.85nm。根据钠的第一支漫线系的里德伯公式 $\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{(3-\Delta_p)^2} - \frac{R}{(4-\Delta_d)^2}$ ，对波长取平均 $\lambda = 568.57nm$ ，又 $\Delta_p = 0.883$ ， $\Delta_s = 0.0134$ ，计算得到钠的里德伯常数为 $R = 1.0978 \times 10^7 m^{-1}$ 。

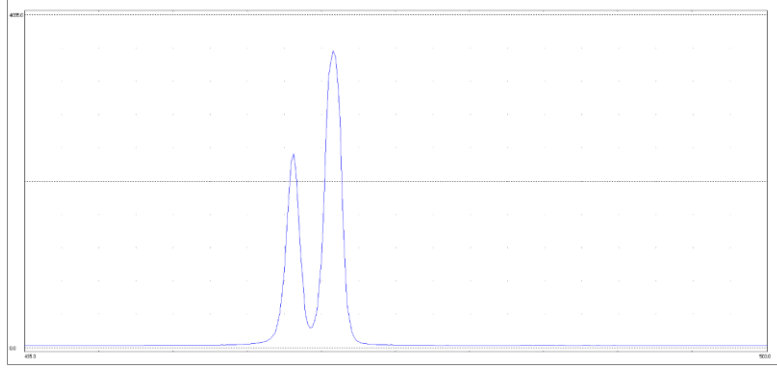


图 5: 钠的漫线系 2

钠第二支漫线系两个峰所对应波长分别为 497.90nm 和 498.33nm。根据钠的第二支漫线系的里德伯公式 $\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{(3-\Delta_p)^2} - \frac{R}{(5-\Delta_d)^2}$ ，对波长取平均 $\lambda = 498.11nm$ ，又 $\Delta_p = 0.883$ ， $\Delta_s = 0.0145$ ，计算得到钠的里德伯常数为 $R = 1.0977 \times 10^7 m^{-1}$ 。

综上所述，钠的主线系、锐线系、第一支和第二支漫线系分别计算得钠的里德伯常数为 $R = 1.0973 \times 10^7 m^{-1}$, $R = 1.0983 \times 10^7 m^{-1}$, $R = 1.0978 \times 10^7 m^{-1}$, $R = 1.0977 \times 10^7 m^{-1}$ 。对得到的四个里德伯常数取平均，得到最终的钠的里德伯常数为

$$R = 1.0978 \times 10^7 m^{-1}$$

查阅资料知，里德伯常数的标准值为 $R = 1.09737 \times 10^7 m^{-1}$ ，与标准值的相对误差为 0.039%。^[2]

5.3 红宝石晶体的发射和吸收光谱测量

实验测得红宝石晶体的发射如下：

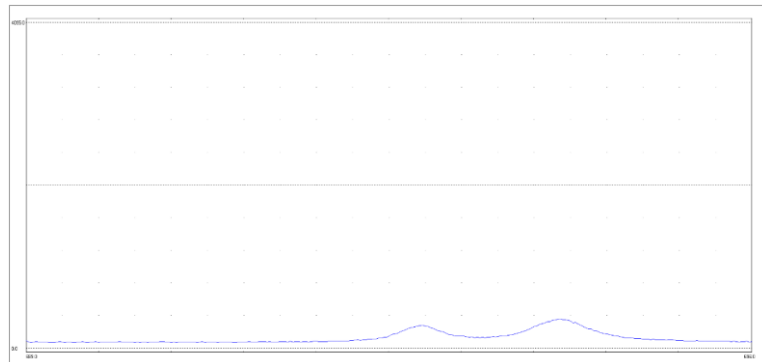


图 6: 红宝石晶体的发射光谱

根据实验数据记录，红宝石晶体的发射光谱的两个波峰对应的波长分别为 692.83nm 和 694.15nm，对应的峰值分别为 283.0 和 367.0。

红宝石晶体发光原理：

红宝石是掺有少量Cr的Al₂O₃单晶，Cr的外层电子组态为3d⁵4s¹，掺入Al₂O₃晶格后，失去外层三个电子，变成三价的Cr³⁺离子。Cr³⁺离子参与激光作用的能级结构图如下图 7 所示：

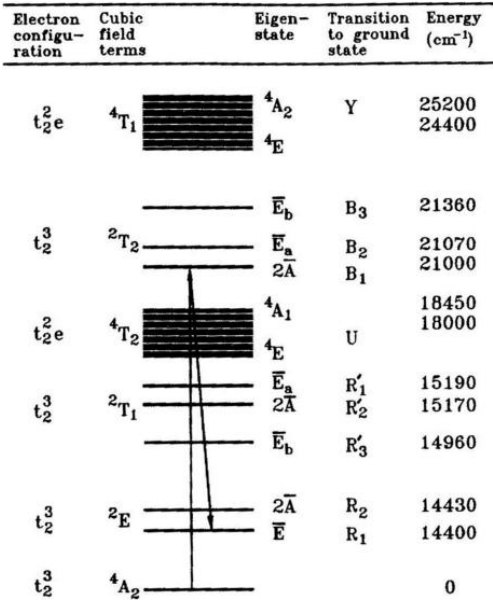


图 7：Cr³⁺离子参与激光作用的能级结构图

图中⁴A₂为基态，²E为亚稳态且寿命较长，⁴T₂和⁴T₁为激发态。当红宝石晶体受到强光激发后，Cr³⁺会跃迁至激发态（如⁴T₂和⁴T₁），随后通过非辐射过程迅速弛豫到亚稳态²E。最终从²E跃迁回基态⁴A₂时，发生辐射跃迁，释放出R₁线和R₂线，形成发射谱。

图 7 显示R₁线和R₂线对应的ν分别为 14400cm 和 14430cm，故理论上其对应的波长应为 694.44nm 和 693.00nm，与实验值 694.15nm 和 692.83nm 吻合较好。又由于R₂较R₁能级高，且高能级的粒子数较少，故R₁线对应的波峰应较高，这也与实验相吻合。

红宝石晶体的应用：^[3]

首先红宝石晶体的发射波长稳定、线宽极窄：R₁线的中心波长几乎不受温度和激发光强影响，非常适合作为单一波长激光源；这使得红宝石成为第一种实用的固体激光器材料，早在 1960 年梅曼就实现了世界上第一台红宝石激光器。^[4]

红宝石晶体的应用有医学美容与手术：红宝石激光对黑色素有选择性吸收，广泛用于

祛斑、除纹身、脱毛等，也用于眼科手术中的光凝治疗。^[5]应用还有激光材料加工：红宝石激光脉冲可用于透明材料（如玻璃、蓝宝石）中的微加工，694 nm 的激光在高聚焦条件下能实现高精度无损加工。^[6]

红宝石晶体的吸收光谱和本底光谱如下：

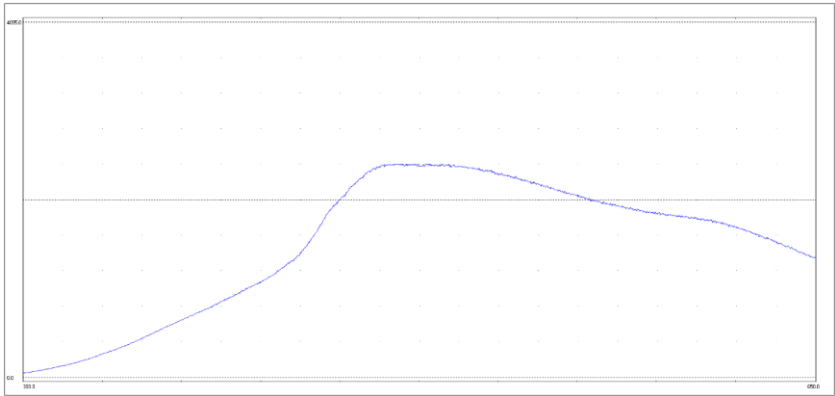


图 8：红宝石晶体的吸收光谱

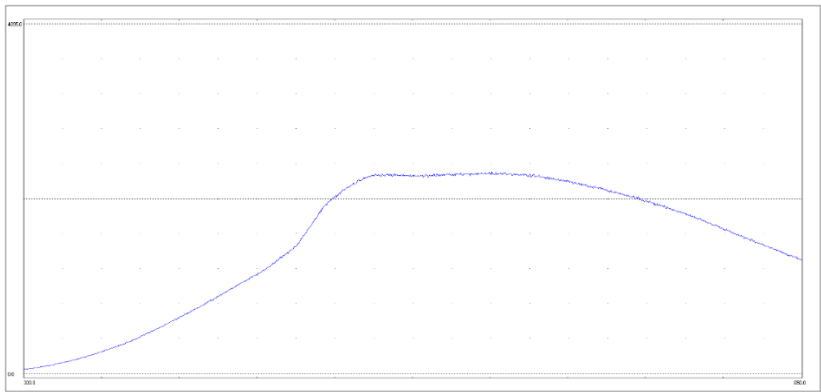


图 9：测量红宝石晶体吸收光谱所使用的激光器的本底光谱

通过作图软件得到红宝石晶体的吸收曲线，即 $\frac{I_0}{I} - \lambda$ 曲线（其中 I 为本底光强）

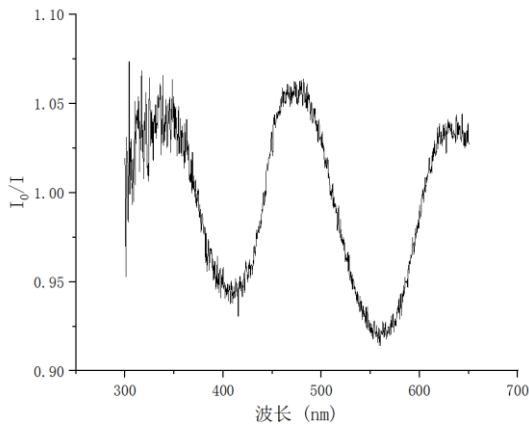


图 10：红宝石晶体的吸收曲线

由图 10 红宝石晶体的吸收曲线知红宝石晶体在 410nm 处和 550nm 处出现两个明显的吸收峰。

5.4 滤光片的吸收曲线测量

实验测得溴钨灯本底光谱以及蓝色和绿色滤光片的吸收光谱如下。

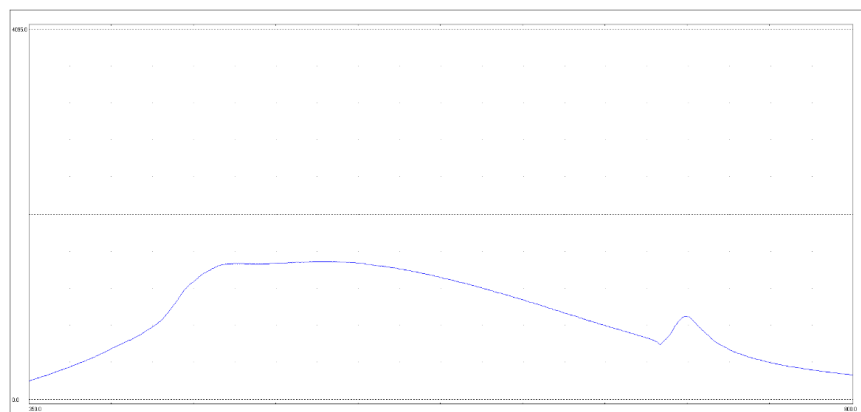


图 8：溴钨灯本底光谱

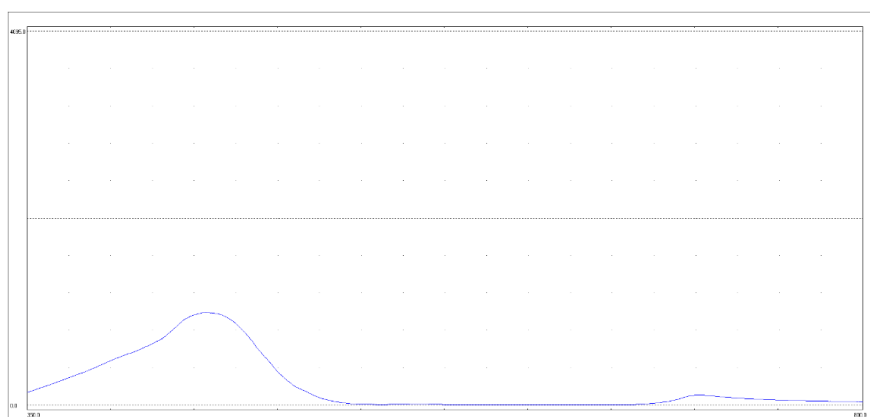


图 9：蓝色滤光片吸收光谱

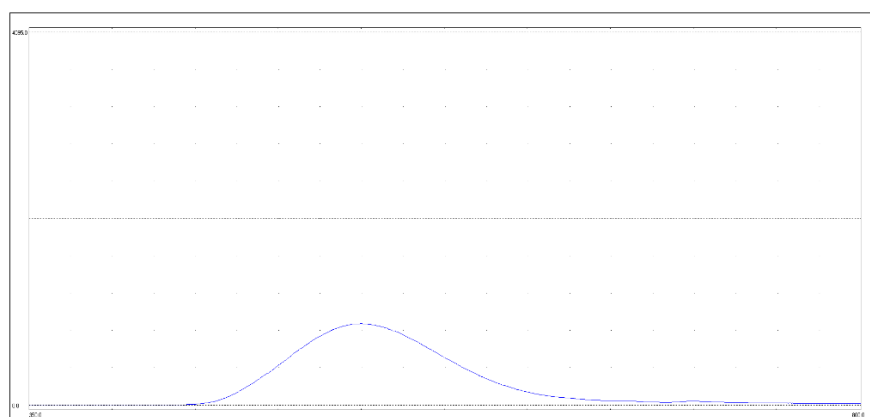


图 10：绿色滤光片吸收光谱

通过作图软件得到滤光片的吸收曲线，即 $A-\lambda$ 曲线 (其中 $A = -\lg(I/I_0)$ 为吸光度)。

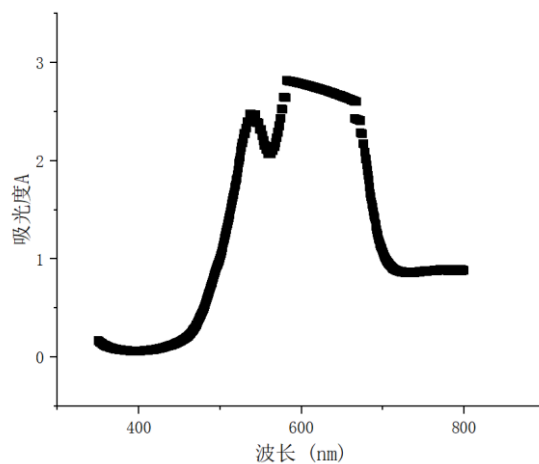


图 11：蓝色滤光片吸收曲线

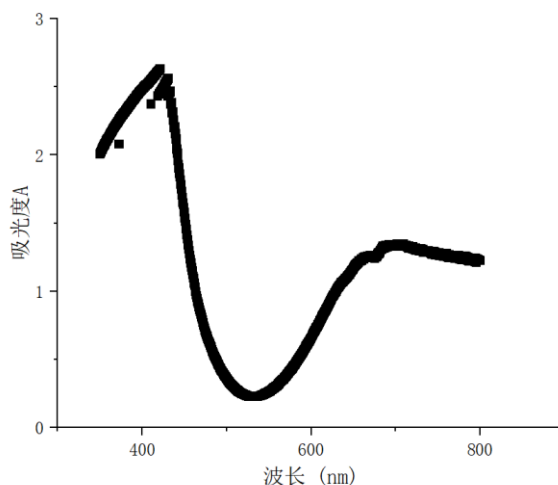


图 12：绿色滤光片吸收曲线

由图 11 和图 12 知，蓝色滤光片在波长 410 nm 附近吸光度较小，吸收较弱，透射率较高；绿色滤光片在波长 530 nm 附近吸光度较小吸收较弱，透射率较高。这一实验结果与滤光片的颜色呈现及其吸收选择性高度一致，符合光学滤光片的基本原理。

蓝色与绿色滤光片分别在 500nm 到 700nm 和 350nm 到 450nm 处达到吸光度极大，此时滤光片性能较好；而在波长大于 700nm 时的吸光度 A 均未超过 1.5，故可认为在波长大于 700nm 时滤光片的性能较弱。

6. 思考题

6.1 如何求出入射狭缝的最佳宽度？

入射狭缝宽度需同时考虑信号强度和分辨率的影响。狭缝越窄，则通过的光束越接近理想单色光，分辨率高；狭缝越宽，则通光量增加，信号强度增强，但波长分辨能力下降。

理论上可令光强和分辨率相等，由瑞利判据得最佳分辨率 $d = 0.86\lambda f/D$ 。

6.2 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 $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN$ ，其中 m 为衍射级次， N 为刻线数。实验中，可通过测量钠的主线系波峰对应的半高宽 $\Delta\lambda$ ，用其除钠的主线系波长 596nm，即可得到单色仪的实际分辨本领。

6.3 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。

实验中使用的单色仪光栅条数为 1200gr/mm，光栅宽度为 30mm，取光栅的一级衍射，故刻线数理论分辨本领约为 36000。实验中测得，钠光灯波长为 589nm 的波峰对应的半高宽为 0.20nm，得到实际分辨本领约为 2950。所以实际分辨本领远小于理论分辨本领。；原因是实际使用的光栅不是理想的成像元件，其产生的球差、像差有可能带来误差，以及狭缝处于非理想宽度，且光源不是理论的点源，实际光源存在杂散光或准直不足。

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

光电倍增管工作原理为：入射光照射阴极释放光电子，然后电子经过一系列“倍增极”，相邻的两倍增电极之间均加有不同的梯度电位用来加速电子，在高压电场作用下不断发生次级电子发射，使每个倍增级上的电子数不断倍增，最终在阳极处收集大量倍增电子，形成可测电信号。副高压越大：单级加速电压增大，次级电子数量增加，放大倍数呈指数增加，最终使敏感度显著提高，可探测极微弱光信号

6.5 说明溴钨灯、钠灯和汞灯的光谱的区别和道理？

溴钨灯光谱是连续谱，而钠灯和汞灯的光谱为分立的谱线。因为溴钨灯的光谱是原子电离出的电子产生的，这些电离电子具有连续的能量分布，因而是连续光谱；而汞灯和钠灯光谱是原子内部电子发生能级跃迁产生的，跃迁电子辐射谱能量是不连续分布的，因而是分立的谱线。

7. 结论

本实验使用光栅光谱仪，用低压钠灯的已知的主线系双光谱线波长对光栅单色仪进行定标，并测量了低压钠灯的主线系、漫线系、锐线系光谱，计算得到钠原子的里德伯常数为 $R = 1.0978 \times 10^7 m^{-1}$ ，然后测量了红宝石晶体的发射和吸收光谱，并分析其发光原理与应用，最后测量了蓝色和绿色滤光片的吸收曲线并分析其性能和吸光特性。

8. 参考文献

- [1]. 单色仪的定标和光谱测量实验. 实验讲义. 2025
- [2]. 徐克尊, 陈向军, 《近代物理学》, 第四版, 中国科学技术大学出版社, 2019
- [3]. 王秉中, 《激光原理与技术》, 科学出版社, 2013
- [4]. Maiman, T.H. “Stimulated optical radiation in ruby”, *Nature*, 1960, 187 (4736): 493-494.
- [5]. Zeng, X. , & Niemz, M. H. (2003). Experimental study of ruby laser ablation on corneal and lens tissues. *Lasers in Surgery and Medicine*, 33(2), 132 - 138.
- [6]. Tani, T., Shibuya, T., & Hirao, K. (2000). Micromachining of transparent materials using ruby laser. *Optical Engineering*, 39(9), 2468 - 2473.