

# 单色仪的定标和光谱测量实验

作者: 刘昆承 学号: PB23020532

## 摘要:

单色仪是指从一束电磁辐射中分离出波长范围极窄单色光的仪器。本实验通过单色仪的定标和光谱测量, 光路调节与定标方法, 测量不同样品的光谱特性, 并通过数据分析加深对光谱学知识的理解。实验采用光栅单色仪, 结合激光和低压钠灯进行定标。通过测量低压钠灯、红宝石晶体、罗丹明 6G 溶液和滤光片的光谱, 分析了其特征谱线和光学性能。主要结果包括: 钠灯光谱测量验证了主线系、漫线系和锐线系特征, 计算得到的里德伯常数 (约为  $1.097 \times 10^7 m^{-1}$ ) 与理论值相符; 红宝石晶体的吸收 (410 nm 和 550 nm) 和发射光谱 (694.3 nm 和 692.8 nm) 确认了其激光工作原理; 滤光片的透射率曲线展示了选择性透过特性; 罗丹明 6G 溶液在不同浓度下的吸收 (550 nm) 和发射光谱 (570 nm) 揭示了荧光染料特性。实验成功验证了单色仪的定标方法和光谱测量技术, 数据结果与理论预期一致, 加深了对光谱学理论的理解。

## 关键词:

单色仪定标、光谱测量、钠灯、红宝石、罗丹明 6G、滤光片

## 1 引言

单色仪是光谱学研究中的核心工具, 用于从复合光中分离出特定波长的单色光, 在物理、化学和材料科学等领域有着广泛应用, 例如研究原子和分子的能级结构、分析物质的光学特性等。其工作原理基于色散元件 (如光栅) 的衍射和干涉效应, 通过精确的光路调节和波长定标, 能够实现高分辨率的光谱测量。本实验旨在通过实际操作, 掌握单色仪的定标方法和光谱测量技术, 探索不同光源和样品的光谱特性, 并通过数据分析加深对相关物理原理的理解。

## 2 实验内容与设计

### 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  $f=500$  mm. 光栅条数: 1200 gr/mm. 狭缝宽度在 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

#### 2.2.1 光栅光谱仪

光栅光谱仪利用衍射作为色散元件, 因此光栅作为分光器件成为决定其性能的主要因素。衍射光栅的色散原理基于单缝衍射和多缝干涉, 其中多缝干涉决定各波长的出射方向, 单缝衍射决定强

度分布. 衍射光强分布为:

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

式中:

- $I_0$  是主极大时的光强 (常量)
- $N$  为光栅周期数 (机器蚀刻可达  $N \approx 10^4$  以上)
- $\frac{\sin^2 \mu}{\mu^2}$  称为衍射因子, 描述单缝衍射影响
- $\frac{\sin^2(N\nu)}{\sin^2 \nu}$  称为多缝干涉因子, 描述多缝干涉影响

参数定义:

$$\mu \equiv \frac{\pi b}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0)$$
$$\nu \equiv \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0)$$

其中:

- $b$  为光栅有效部分宽度 (透射光栅对应缝宽, 反射光栅对应反射部分宽度)
- $d$  为光栅常数 (空间周期)

光栅衍射方程:

$$d(\sin \theta - \sin \theta_0) = m\lambda \quad (2)$$

- $m \in \mathbb{Z}^+$  为光谱级次
- $\theta_0$  处出现暗纹
- 当满足  $N \tan \nu = \tan(N\nu)$  时出现次极大

### 2.2.2 光的吸收和介质的吸收曲线

当一束波长为  $\lambda$ 、入射光强为  $I_0$  的单色平行光垂直入射到厚度为  $d$  的介质平板时:

- 界面 1 的反射光强为  $I_R$
- 通过界面 1 进入介质的光强为  $I_1$
- 到达界面 2 的光强为  $I_2$
- 最终透射光强为  $I_T$

透射率定义

光谱外透射率:

$$T \equiv \frac{I_T}{I_0} \quad (3)$$

介质的光谱透射率:

$$T_i \equiv \frac{I_2}{I_1} \quad (4)$$

## Lambert-Beer 定律

当介质在透光方向均匀时, 透射率与厚度的关系:

$$T_i = e^{-\alpha d} \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为介质的线性吸收系数, 其测定公式:

$$\alpha = \frac{\ln T_1 - \ln T_2}{d_2 - d_1} = \frac{1}{d_2 - d_1} \ln \left( \frac{T_1}{T_2} \right) \quad (6)$$

## 2.3 实验步骤

### 1. 光栅单色仪的定标

- 光源: 低压钠灯 (589.0 nm 和 589.6 nm) .
- 步骤: 设计并调整光路, 将光导入入射狭缝, 选取合适的负高压值, 利用采集程序测量并获取钠灯双光谱线完全分离的光谱曲线, 记录负高压值并保存曲线.
- 目的: 校正波长误差, 确保测量准确性.

### 2. 低压钠灯的光谱测量

- 目标: 观察钠原子的主线系 (589.0 nm、589.6 nm)、漫线系 (568.3 nm、568.86 nm 等)、锐线系 (616.0 nm、615.4 nm) 和柏格曼线系.
- 步骤: 调整仪器测量谱线精细结构, 记录特征波长, 通过波数差计算钠的里德伯常数  $R$ .
- 目的: 研究钠原子光谱特性并验证理论.

### 3. 红宝石晶体的发射和吸收光谱测量

- 光源: 半导体激光器 (532 nm)、溴钨灯 (360–2500 nm) .
- 步骤: 设计光路, 调整负高压值, 测量红宝石的发射光谱 (R1: 694.3 nm, R2: 692.8 nm) 和吸收光谱 (410 nm、550 nm 吸收带) .
- 目的: 分析  $\text{Cr}^{3+}$  离子的能级跃迁、发光原理及激光应用.

### 4. 滤光片的吸收曲线测量

- 光源: 溴钨灯 (360–2500 nm) .
- 步骤: 调整光路, 插入滤光片, 选取合适负高压值, 测量吸收曲线.
- 目的: 研究滤光片的性能和吸光特性.

### 5. 罗丹明 6G 溶液的发射和吸收光谱测量

- 光源: 溴钨灯 (360–2500 nm)、半导体激光器 (532 nm) .
- 步骤: 使用比色皿装载罗丹明 6G 溶液, 调整光路, 选取负高压值, 测量吸收光谱.
- 目的: 分析溶液的光谱性能和吸光特性.

### 3 实验结果

#### 3.1 光栅单色仪的定标

调节光路, 使得钠灯光线较好地导入狭缝. 对钠灯主线系 589.0nm 和 589.6nm 的双线进行测量, 将测量结果与标准值进行比对定标.

##### 3.1.1 实验方法与光源

实验采用以下光源进行定标:

- 氦氖激光 (632.8 nm)
- 低压钠灯 (589.0 nm 和 589.6 nm)

根据光栅方程式:

$$d(\sin \varphi + \sin \theta) = \lambda$$

其中,  $d$  为光栅常数,  $\varphi$  为入射角,  $\theta$  为衍射角,  $\lambda$  为波长. 实验中固定入射角  $\varphi$ , 通过测量钠灯双线和氦氖激光的衍射角  $\theta$ , 拟合线性关系  $\lambda = k\theta + b$ , 得到定标方程.

##### 3.1.2 实验结果和数据处理

- 未定标光谱: 如图 1.
- 定标后光谱: 如图 2, 分离出 589.0 nm 和 589.6 nm 双线.

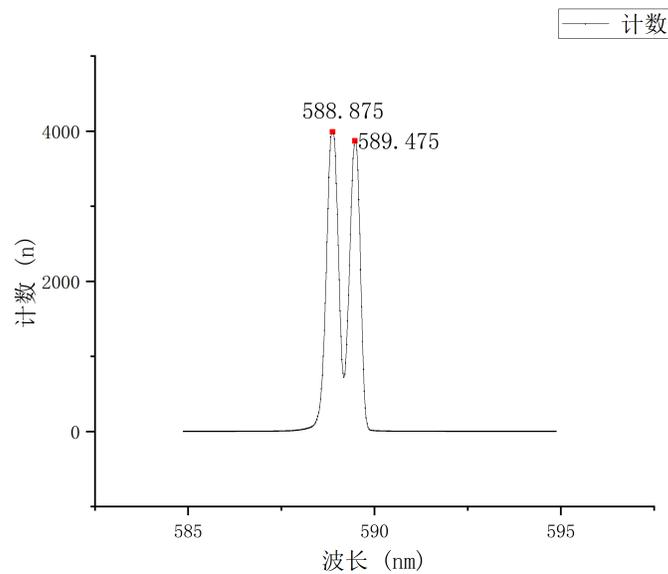


图 1: 钠灯原始光谱 (未定标)

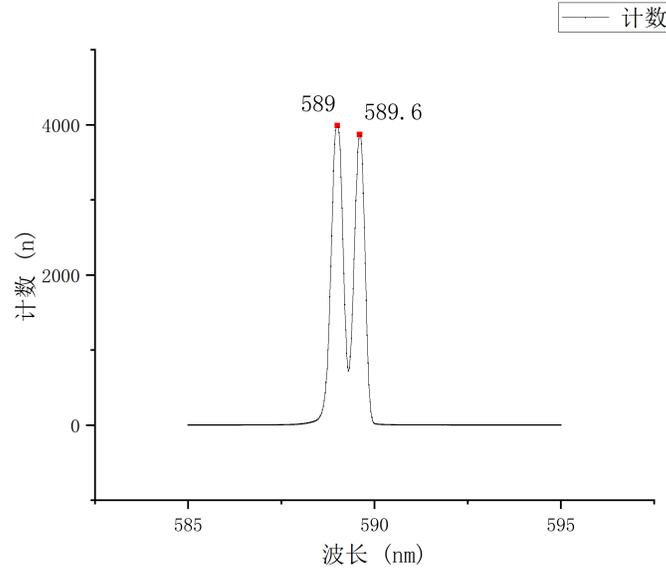


图 2: 钠灯定标后光谱

## 3.2 钠灯光谱测量

### 3.2.1 实验方法

测量低压钠灯的光谱, 记录特征谱线并分析其来源.

#### 1. 记录谱线波长:

- 主线系: 589.0 nm 和 589.6 nm
- 漫线系: 497.78 nm 和 498.2 nm ( $n=5$ ), 568.3 nm 和 568.86 nm ( $n=4$ )
- 锐线系: 615.4 nm 和 616.0 nm

#### 2. 计算波数: $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$ (单位: $\text{cm}^{-1}$ ).

### 3.2.2 实验结果

记录钠灯主线系 (589.0/589.6 nm), 漫线条 (568.3/568.86 nm  $n=4$  497.78nm/498.2nm  $n=5$ ), 锐线条 (615.4/616.0 nm) 的波长, 计算波数差及里德伯常数

钠漫线系 1 的波长为 497.78nm/498.2nm 测量时增益为 1, 狭缝宽度为 0.110mm, 负高压为 743V 钠漫线系 3 的波长为 568.3nm/568.86nm 测量时增益为 1, 狭缝宽度为 0.110mm, 负高压为 743V

实际测量中, 漫线系 1 两个峰值在 497.80nm/498.23nm, 漫线系 2 两个峰值在 568.25nm/568.83nm;

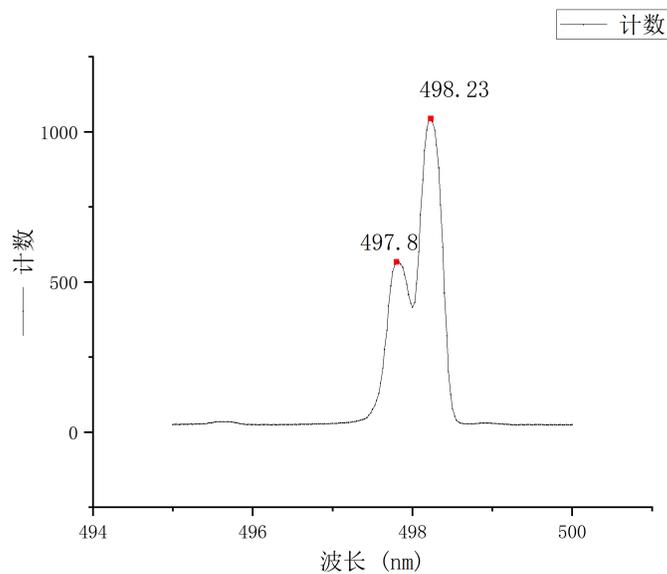


图 3: 钠灯及漫线系第一对 (497.78 nm 与 498.2 nm)

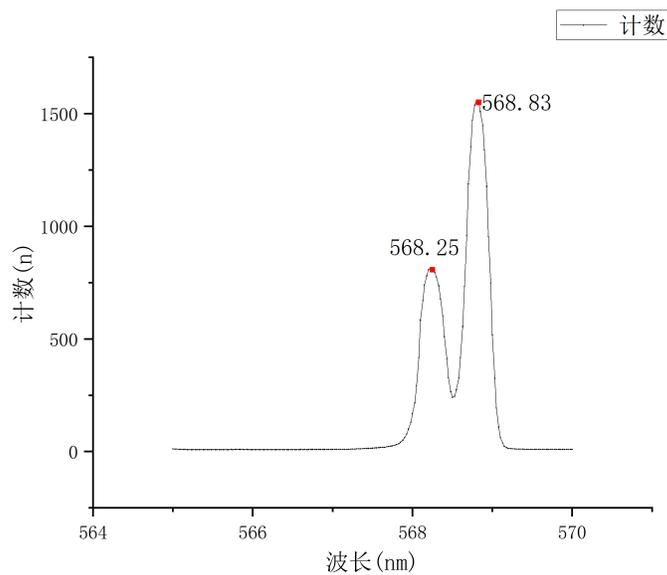


图 4: 钠灯漫线条第二对 (568.3 nm 与 568.86 nm)

钠主线系的波长为 589.0nm/589.6nm 测量时增益为 1, 狭缝宽度为 0.100mm, 负高压为 242V 实际测量的两个峰值在 589.00nm/589.60nm

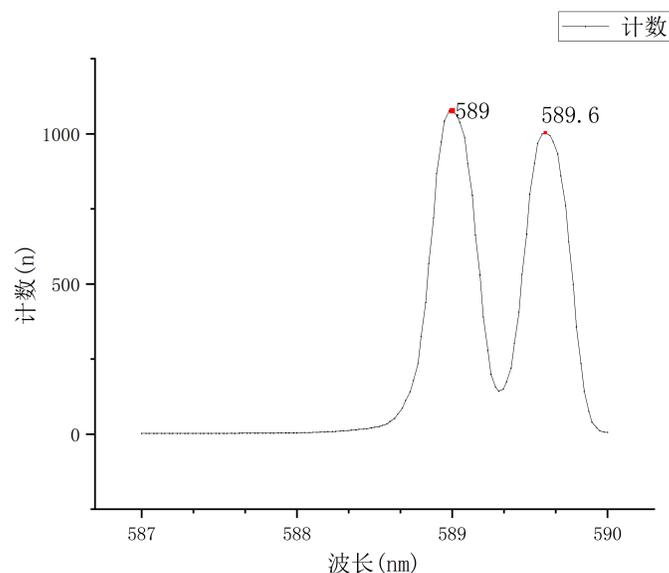


图 5: 钠灯主线系 (理论 589.0 nm 与 589.6 nm)

钠锐线系的波长为 615.4nm/616.0nm 测量时增益为 1, 狭缝宽度为 0.100mm, 负高压为 747V. 实际测量的两个峰值在 615.18nm/615.9nm

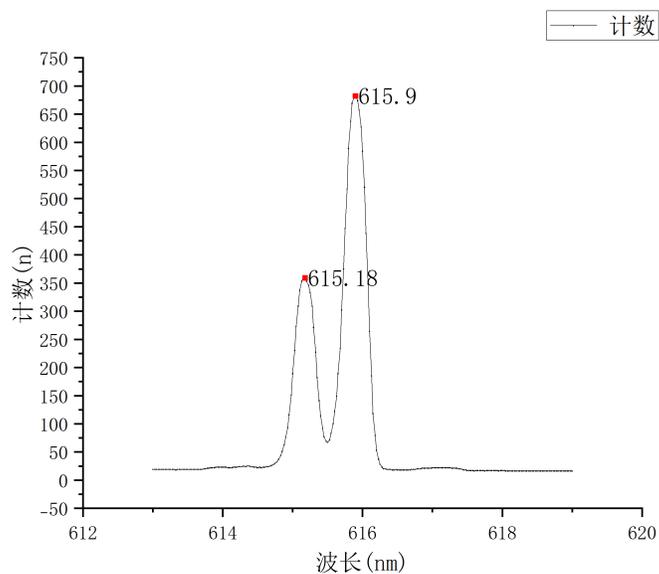


图 6: 钠灯锐线系 (616.0 nm 与 615.4 nm)

### 3.2.3 数据处理

钠原子光谱包括:

1. 主线系:  $3p \rightarrow 3s$  跃迁.
2. 漫线系:  $4p \rightarrow 3s$  跃迁.
3. 锐线系:  $3d \rightarrow 3p$  跃迁.

这些谱线反映了钠原子的能级结构, 与讲义中的理论一致.

### 3.2.3.1 里德伯常数 $R$

对于钠的三个线系, 分别满足如下公式:

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

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

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{(3 - \Delta_p)^2} - \frac{R}{(n - \Delta_d)^2}, \quad n = 4, 5$$

分别代入计算, 可得:

有效量子数计算:

- 3S 有效量子数:

$$\delta_s = 1.373, \quad n_s^* = 3 - \delta_s = 1.627$$

- 3P 有效量子数:

$$\delta_p = 0.883, \quad n_p^* = 3 - \delta_p = 2.117$$

- 3D 有效量子数:

$$\delta_d \approx 0.014, \quad n_d^* = 3 - \delta_d \approx 2.986$$

钠的里德伯常数为: 主线系

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

锐线系

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

漫线系

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{(3 - \Delta_p)^2} - \frac{1}{(n - \Delta_d)^2} \right), \quad n = 4, 5$$

- 主线系

$$R_1 = 1.103 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

- 锐线系

$$R_2 = 1.104 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

- 漫线系

- 当  $n = 4$  时:

$$R_3 = 1.124 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

- 当  $n = 5$  时:

$$R_4 = 1.123 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

则

$$\bar{R} = \sum_4^{i=0} R_i / 4 = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

### 3.3 红宝石晶体光谱分析

#### 3.3.1 实验方法

测量红宝石晶体的吸收和发射光谱.

- 发射光谱: 提取  $R_1(694.3 \text{ nm})$  和  $R_2(692.8 \text{ nm})$  峰位.
- 吸收光谱

测量时增益为 1, 狭缝宽度为 0.100mm, 负高压为 617V. 实际测量的两个峰值在 692.68nm/694.13nm. 前者近似对应  $2A \rightarrow 4A_2$  能级的自发跃迁辐射; 后者近似对应  $E \rightarrow 4A_2$  能级的自发跃迁辐射

#### 3.3.2 实验结果

- 发射光谱: 如图 7.
- 吸收光谱: 如图 9, 吸收带与理论 410 nm 和 550 nm.

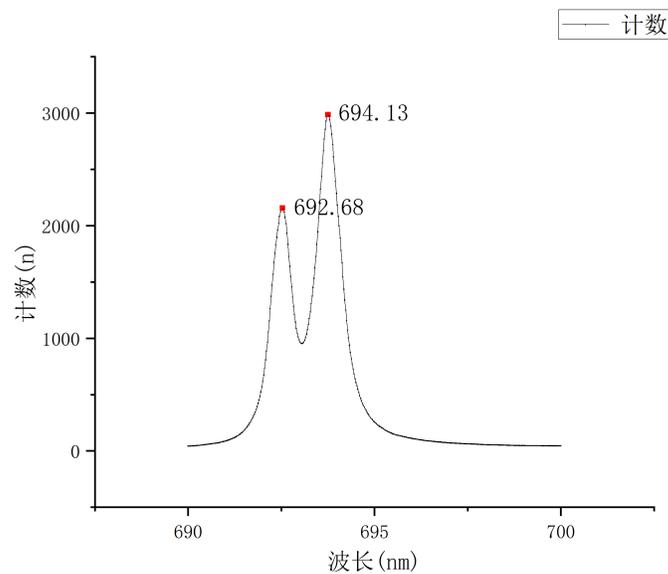


图 7: 红宝石发射光谱

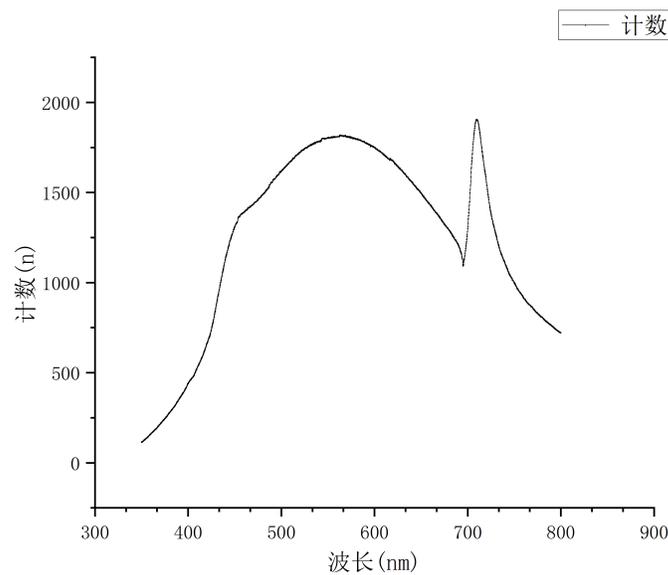


图 8: 溴钨灯背景光谱 (无红宝石)

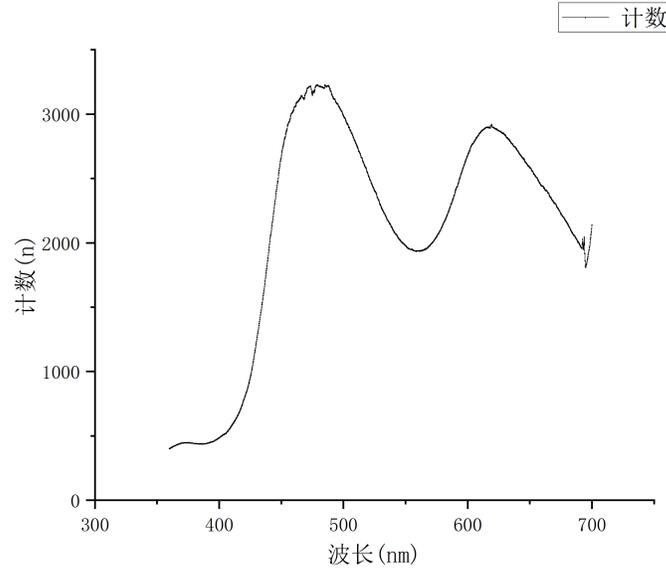


图 9: 红宝石吸收光谱

### 3.3.3 红宝石吸收特性曲线

由于绝对光强无从知道, 我们这里给出吸收率的一个相对关系的图:

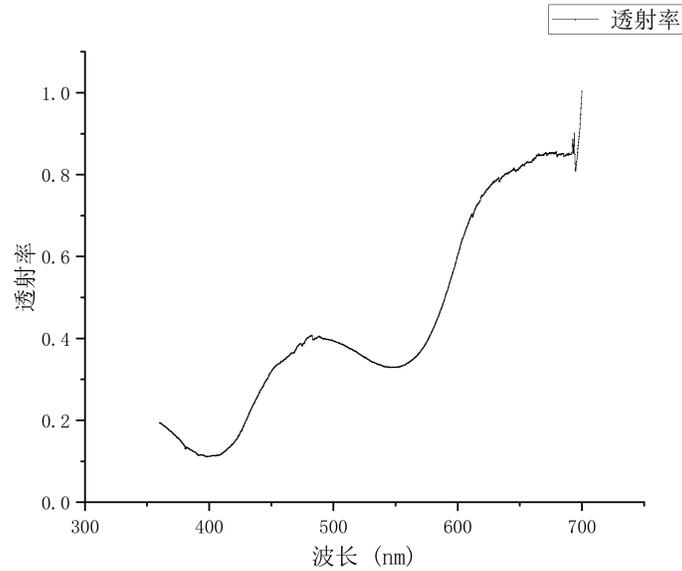


图 10: 红宝石晶体吸收特性曲线

### 3.4 滤光片透射率测量

使用溴钨灯测量蓝, 绿, 红滤光片的透射光谱.

透射率计算公式:

$$T = \frac{I_{\text{滤光片}}}{I_{\text{背景}}}$$

### 3.4.1 实验结果

- 蓝滤光片: 主峰约 450 nm(图 12).
- 绿滤光片: 主峰约 550 nm(图 14).
- 红滤光片: 主峰约 650 nm(图 16).

#### 3.4.1.1 溴钨灯背景光谱

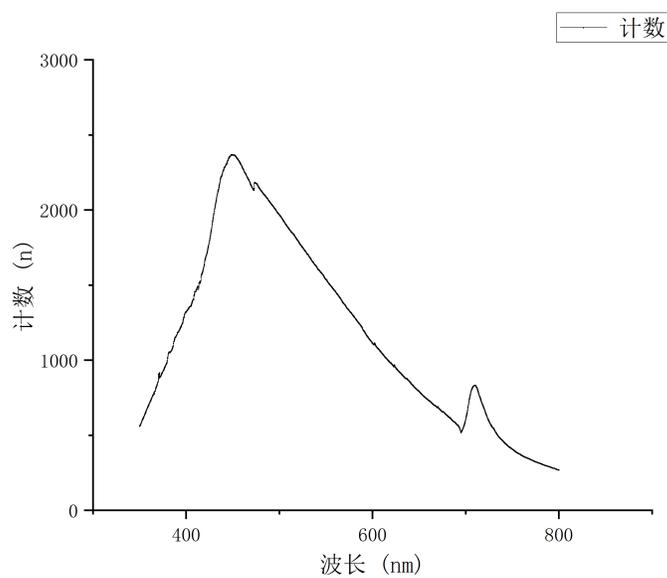


图 11: 溴钨灯背景光谱 (透射率计算基准)

### 3.4.1.2 蓝滤光片

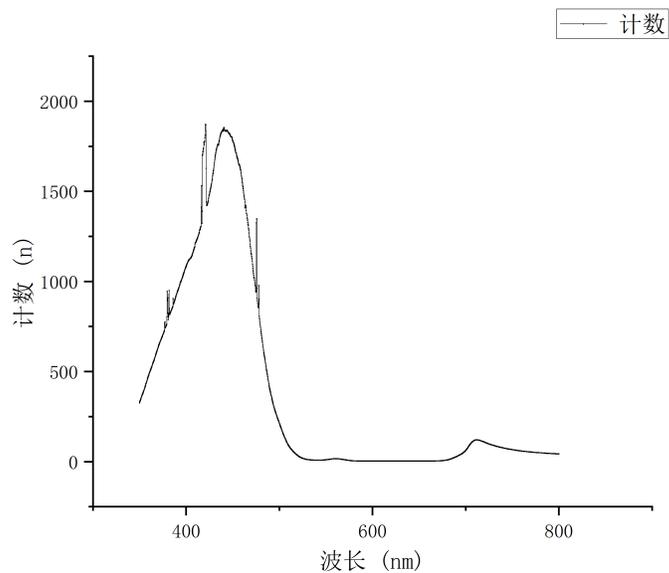


图 12: 蓝滤光片透射光谱 (主峰约 450 nm)

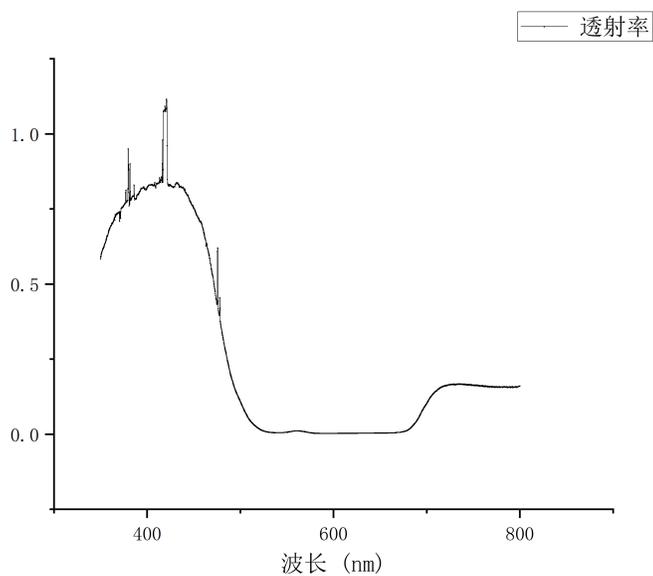


图 13: 蓝滤光片透射率曲线 ( $I/I_0$ )

### 3.4.1.3 绿滤光片

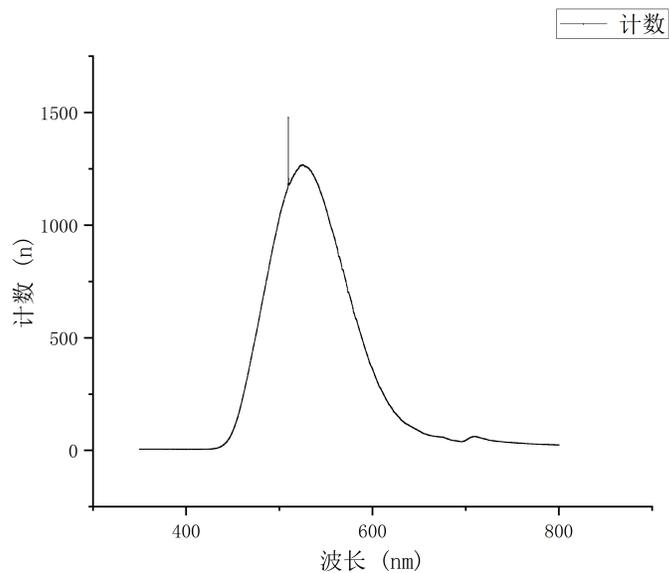


图 14: 绿滤光片透射光谱 (主峰约 550 nm)

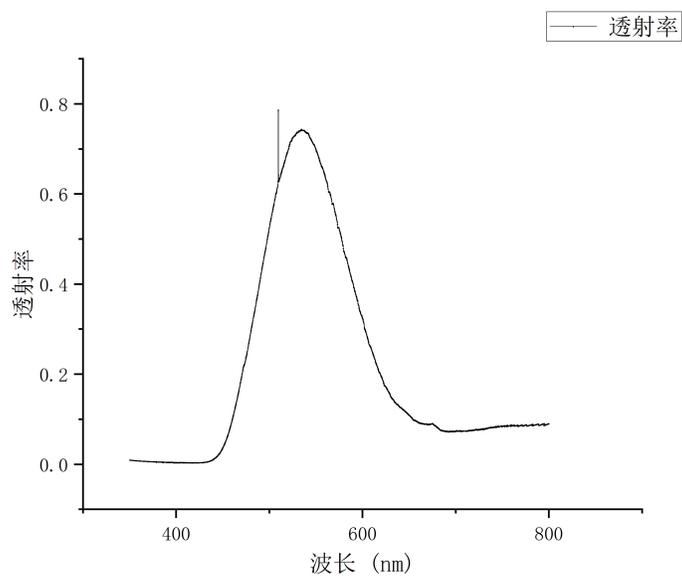


图 15: 绿滤光片透射率曲线 ( $I/I_0$ )

### 3.4.1.4 红滤光片

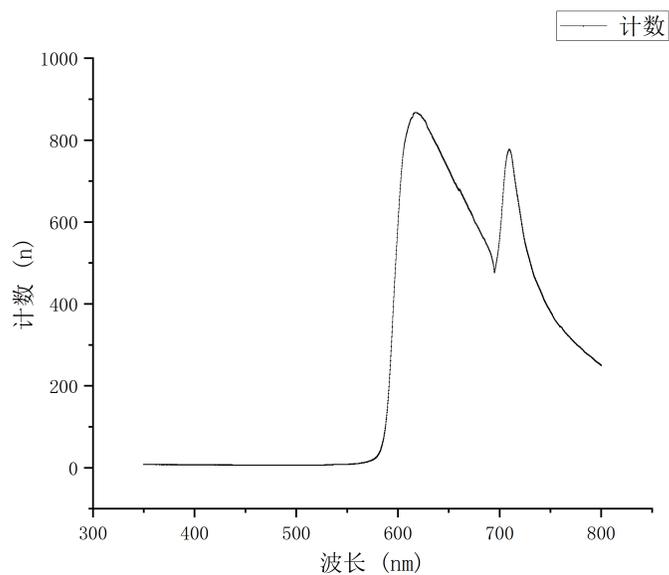


图 16: 红滤光片透射光谱 (主峰约 650 nm)

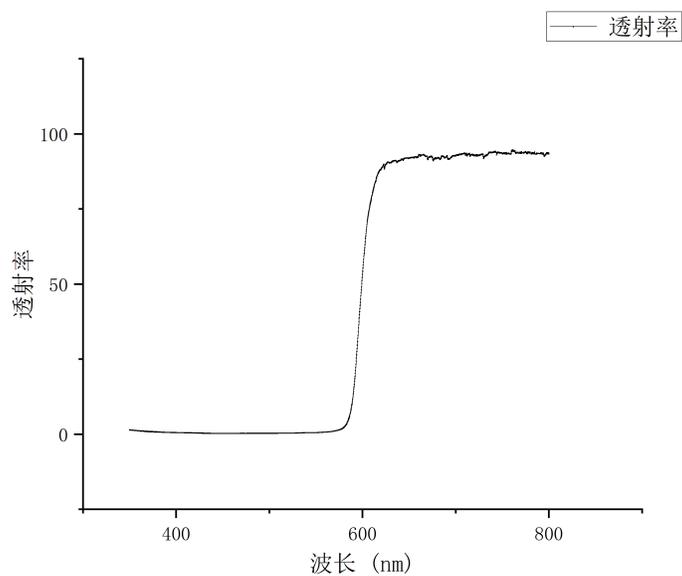


图 17: 红滤光片透射率曲线 ( $I/I_0$ )

### 3.4.1.5 结果分析

三种滤光片的透射率曲线均表现出明显的带通特性:

- 蓝滤光片的透射峰位于约 450 nm 在附近波段具有较高的透过效率,并能有效阻止其他可见光波段的透射.
- 绿滤光片的透射峰位于约 550 nm 在附近波段透射最强,对上下两侧波段衰减明显.
- 红滤光片的峰值约为 650 nm 在附近波段透射最强,而可见光短波段透射率几乎为零.

从峰值位置来看,滤光片的中心波长与各颜色主波段高度一致三者的最大透射率均超过 70%,最优达到约 85%,说明滤光片基底材料及镀膜工艺能提供较低的光学损耗

透射损失主要源于滤光片材料对指定波段以外光的吸收和反射镀膜的干涉效应:

在截止区(如蓝滤光片  $>500$  nm,绿滤光片  $<500$  nm 及  $>600$  nm 区段),透射率极低,说明基底玻璃或介质膜对该区段光子吸收强

### 3.5 罗丹明 6G 酒精溶液光谱分析

#### 3.5.1 实验方法

使用比色皿装载罗丹明 6G 溶液,调整光路,选取负高压值,测量吸收光谱.分析溶液的光谱性能和吸光特性.

#### 3.5.2 数据处理方法

- 吸收光谱
- 发射光谱

#### 3.5.3 实验结果

- $10^{-4}M$ : 吸收峰 550 nm(图 22), 发射峰 570 nm(图 24).
- $10^{-5}M$ : 强度降低(图 25 和 26).
- $10^{-6}M$ : 强度进一步降低(图 27 和 28).

### 3.5.3.1 溴钨灯背景光谱

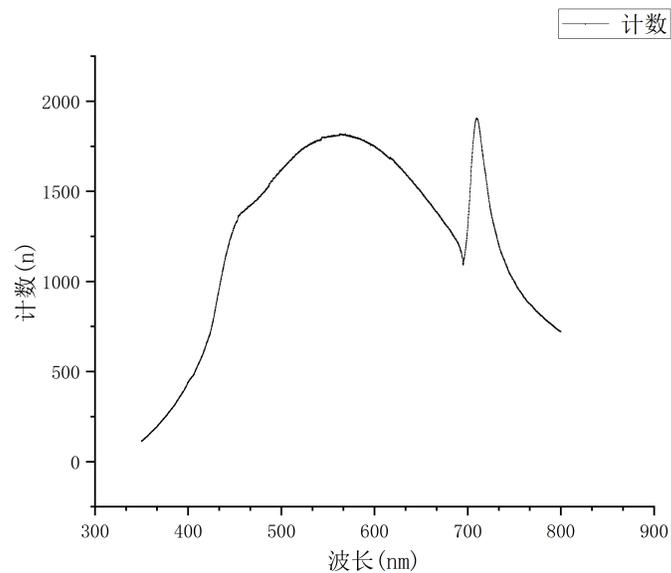


图 18: 溴钨灯背景光谱

### 3.5.3.2 浓度 0(溶剂背景)

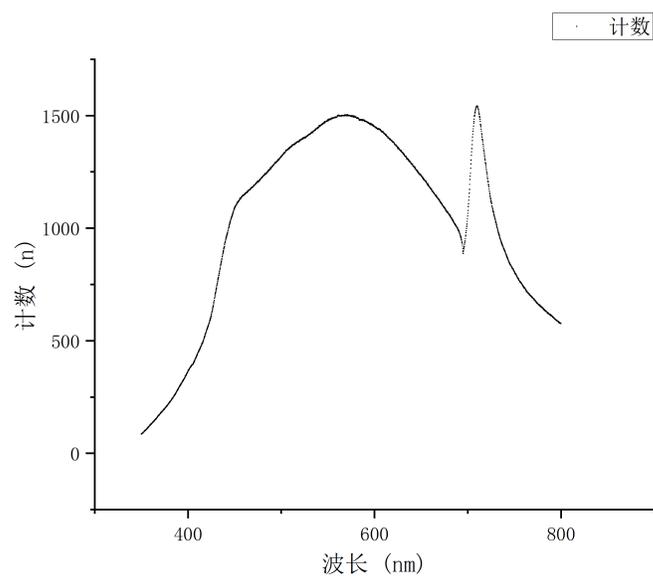


图 19: 浓度 0(溶剂  $5 \times 10^{-3} M$  乙醇) 吸收谱

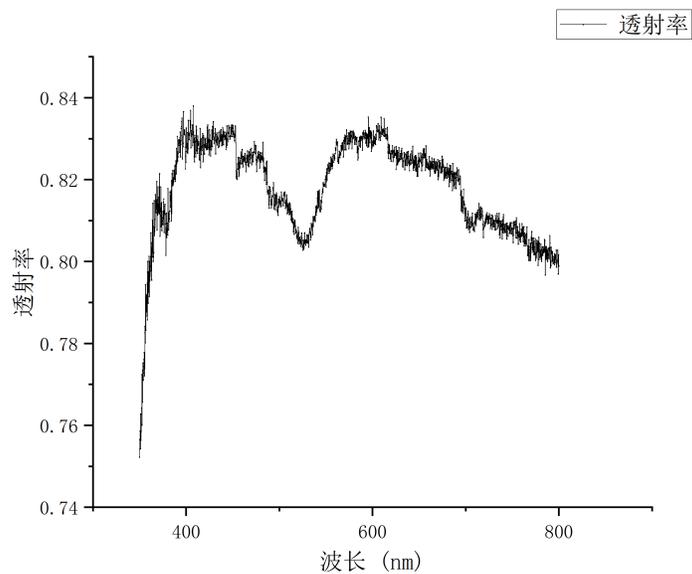


图 20: 浓度 0(溶剂  $5 \times 10^{-3}M$  乙醇) 吸收透过率曲线

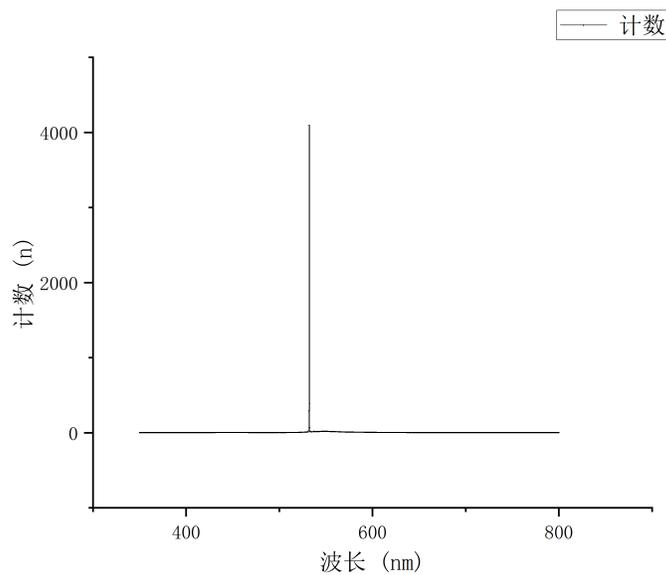


图 21: 浓度 0(溶剂  $5 \times 10^{-3}M$  乙醇) 发射谱

### 3.5.3.3 $10^{-4}M$ 浓度

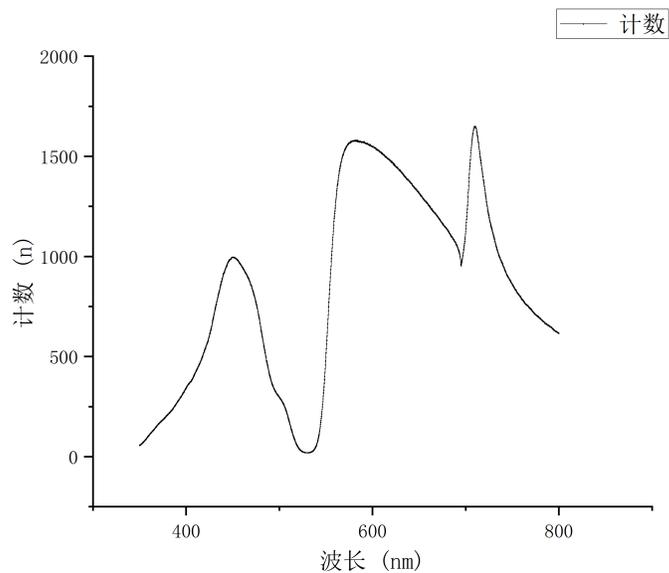


图 22:  $10^{-4}M$  罗丹明 6G 吸收谱 (特征吸收峰 550 nm)

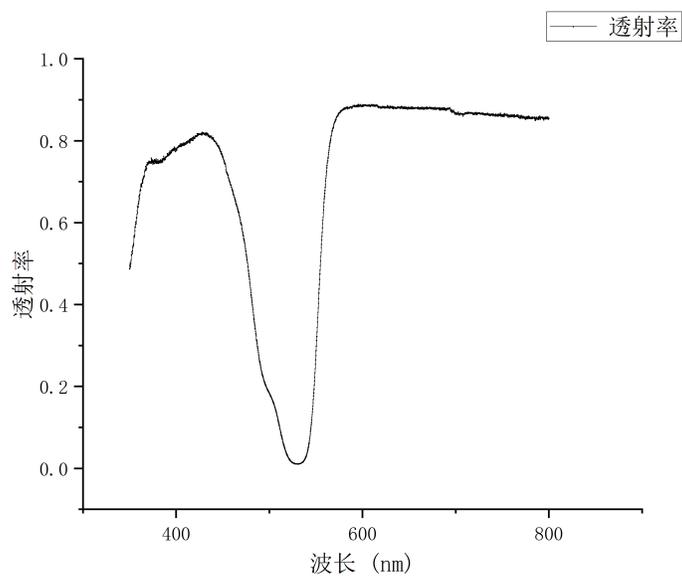


图 23:  $10^{-4}M$  罗丹明 6G 吸收透过率曲线

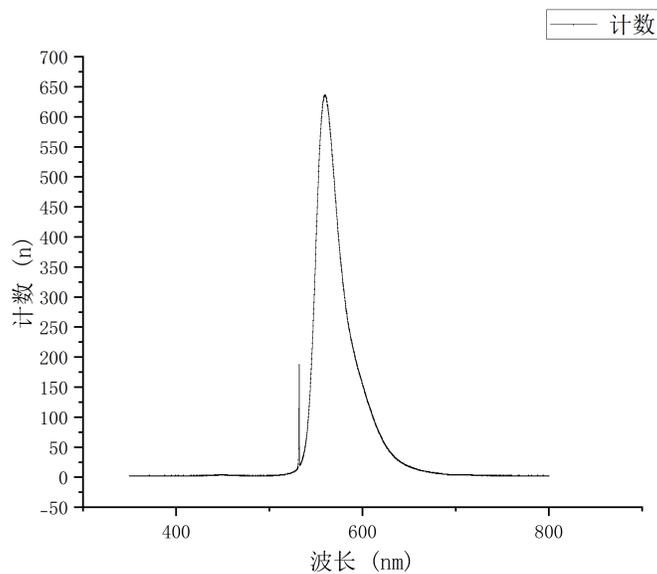


图 24:  $10^{-4} M$  罗丹明 6G 发射谱 (荧光峰约 570 nm)

### 3.5.3.4 $10^{-5} M$ 浓度

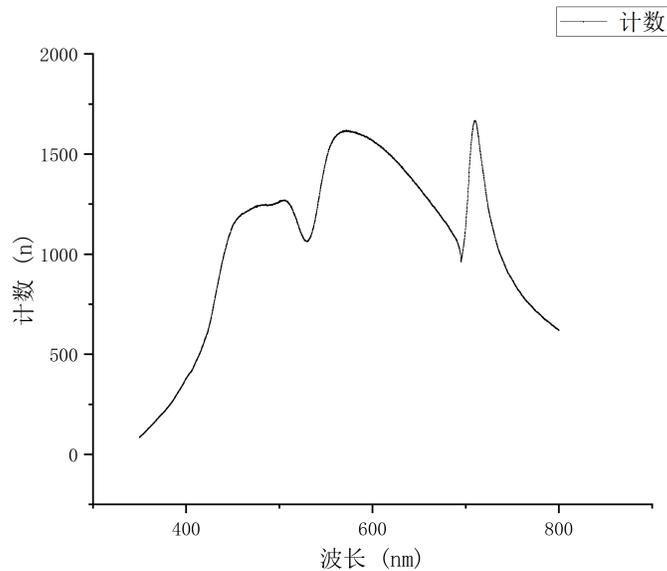


图 25:  $10^{-5} M$  罗丹明 6G 吸收谱 (吸收峰强度降低)

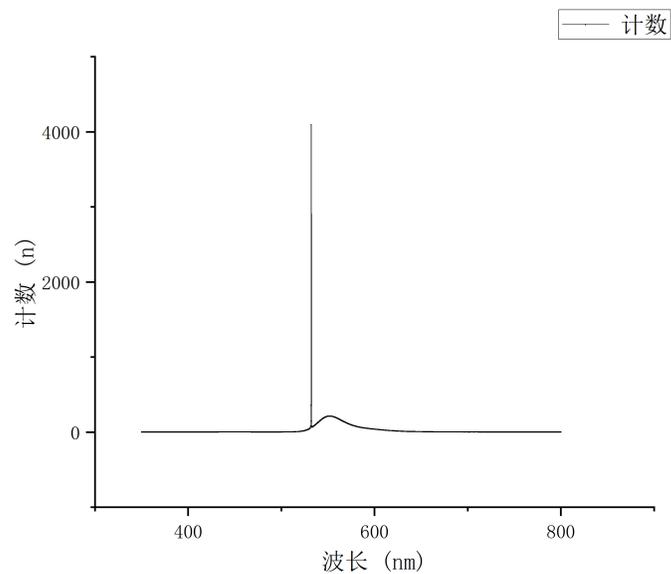


图 26:  $10^{-5} M$  罗丹明 6G 发射谱 (荧光强度减弱)

### 3.5.3.5 $10^{-6} M$ 浓度

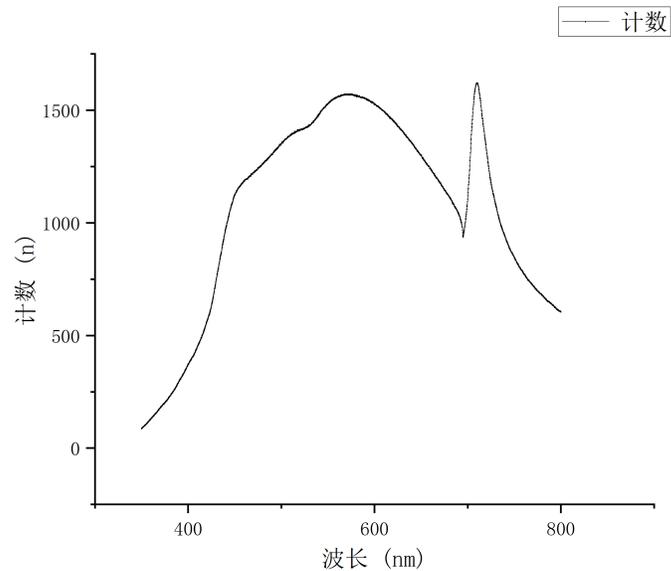


图 27:  $10^{-6} M$  罗丹明 6G 吸收谱 (低浓度下信噪比下降)

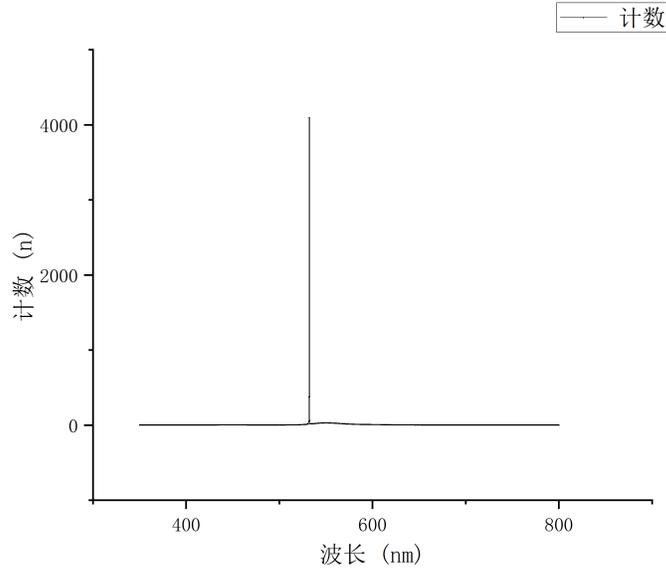


图 28:  $10^{-6}M$  罗丹明 6G 发射谱 (微弱荧光信号)

### 3.5.3.6 结果分析

#### 吸收特性

实验中, 罗丹明 6G 在乙醇溶液中的吸收光谱显示出明显的特征吸收峰, 峰位集中在 550 nm 左右 (图 22). 这一吸收峰归因于分子的  $\Pi - \Pi^*$  跃迁, 与文献报道一致. 随着浓度从  $10^{-4} M$  下降至  $10^{-6} M$ , 吸收峰的峰高显著降低, 但峰位基本保持不变, 表明在此浓度范围内, 溶液的分子环境和电子态能级未发生显著变化, 仅因分子数目减少导致的吸光度下降.

#### 发射特性

罗丹明 6G 的荧光发射谱在激发波长附近产生约 570 nm 的发射峰 (图 24), 对应于分子从激发态返回基态的辐射跃迁. 该发射峰与吸收峰之间约 20 nm 的斯托克斯位移 (Stokes shift) 有助于减少激发光干扰, 并提高检测信噪比. 在低浓度 ( $10^{-6} M$ ) 条件下, 发射峰的荧光强度明显减弱, 甚至出现噪声占优的情况 (图 28), 表明对微量检测时应注意仪器灵敏度和背景校正.

#### 浓度依赖与自猝灭效应

在高浓度 ( $10^{-4} M$ ) 时, 吸收和发射强度均达到最高; 将浓度稀释至  $10^{-5} M$  后, 谱线强度约下降 50% 以上, 进一步稀释到  $10^{-6} M$  时, 信号强度下降更多. 此过程中未观察到明显的自吸收或自猝灭 (concentration quenching) 造成的谱峰位漂移, 但高浓度时吸收光谱可能出现轻微展宽, 提示分子间作用力增大.

#### 杂散光与激光干扰

吸收光谱中 532 nm 的尖峰是部分激光光源泄漏所致, 属于仪器背景光的一部分.

### 3.6 思考题

#### 3.6.1 如何求出入射狭缝的最佳宽度?

分辨率  $\Delta\lambda$  与狭缝宽度  $w$  成正比, 近似关系为:

$$\Delta\lambda = \frac{w}{D}$$

其中  $D$  为线色散率. 钠灯双线 (589.0 nm 和 589.6 nm) 调整  $w$  使两谱线刚好分离, 同时保持足够的光强. 狭缝宽度对光强和分辨率的影响趋势是相反的, 光学的做法通常是令两者相等, 利用瑞利判据可得  $d = 0.86\lambda f/D$

#### 3.6.2 单色仪的理论分辨本领如何计算?

单色仪的理论分辨本领  $R$  定义为:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = m \cdot N$$

其中  $m$  为衍射级次,  $N$  为光栅总刻线数. 而在实际测量中, 用  $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$  计算即可, 利用 Na 谱线结果  $\Delta\lambda$  是谱线峰的半高宽度, 测量图中得到分辨率为 2300 左右

#### 3.6.3 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

理论分辨本领为理想条件下的  $R = m \cdot N$ . 然而, 实际分辨本领  $R_{\text{实际}}$  远低于理论值, 即:

$$R_{\text{实际}} < R_{\text{理论}}$$

原因:

- 光路未准直: 导致光束发散, 降低分辨率.
- 光源线宽: 天然宽度限制分辨能力.
- 探测器噪声: 影响信号检测.
- 光栅缺陷: 降低衍射效率.
- 狭缝宽度过大: 增加  $\Delta\lambda$ .

#### 3.6.4 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?

光电倍增管通过光电效应将光子转化为电子, 再通过倍增极放大信号. 工作原理如下:

1. 高压加速光电子撞击倍增极, 产生更多二次电子.
2. 多级倍增后, 信号显著放大.

随着负高压  $V$  的绝对值增加, 增益  $G$  增长电压越高, 电子倍增效应越强, 灵敏度显著提高.

### 3.6.5 溴钨灯、钠灯和汞灯的光谱的区别和道理

溴钨灯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，因而是连续谱，叠加起来表现为白光；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；特别地，钠是碱金属，其电子跃迁谱线因塞曼效应明显，会产生分裂，故而表现为双线

## 4 结论

本实验通过单色仪的定标和多种样品的光谱测量，定标与分辨能力验证：利用氩氦激光和低压钠灯成功定标单色仪。测量并分析了钠灯的主线系 (589.0 nm 和 589.6 nm)、漫线系 (497.78 nm、498.2 nm、568.3 nm、568.86 nm) 和锐线系 (615.4 nm、616.0 nm) 计算得到的里德伯常数  $1.097 \times 10^7 m^{-1}$ ，验证了原子光谱理论。测得红宝石的吸收光谱 (中心波长约 410 nm 和 550 nm) 与发射光谱 ( $R_1$  线 694.13nm 和  $R_2$  线 692.68nm)，确认了  $Cr^{3+}$  离子的能级结构及其激光工作原理。滤光片性能：测得蓝 (450 nm)、绿 (550 nm) 和红 (650 nm) 滤光片的透射率曲线，验证了其选择性透过特性，与预期光学性能相符。罗丹明 6G 光谱：分析了不同浓度 ( $10^{-4}M$ 、 $10^{-5}M$ 、 $10^{-6}M$ ) 罗丹明 6G 溶液的吸收峰 (550 nm) 和发射峰 (570 nm)，结果显示浓度降低时光谱强度减弱，符合荧光染料的光学特性。本实验通过单色仪的定标与光谱测量，不仅掌握了光谱分析的基本技术，还深入理解了原子光谱、晶体光谱和染料光谱的相关理论，为后续研究提供了宝贵经验。实验中发现的问题也为进一步优化提供了方向。

## 参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 单色仪的定标和光谱测量实验. 2025.
- [2] 谢行恕, 康世秀, and 霍剑青. 大学物理实验, volume 第三册. 高等教育出版社, 北京, 第二版 edition, 2005.