



大学物理综合实验——单色仪定标和光谱测量

刘元彻 PB21020505 21 级物理学院 1 班

2023 年 3 月 27 日

摘要: 单色仪 (monochromator) 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。物理实验中, 常常运用单色仪分离光谱制造 (准) 单色光, 利用单色光优秀的相干度完成相干实验。本实验利用单色仪, 进行了基本的定标和光谱测量操作学习, 并利用光谱测量的数据, 计算了里德堡常量和红宝石的吸收特性曲线。[1]

关键词: 单色仪; 衍射光栅; 闪耀光栅; 光谱测量;

1 实验原理

1.1 光栅光谱仪 [1]

光栅光谱仪是利用衍射作为色散元件, 因此光栅作为分光器件就成为决定光栅光谱仪的性能的主要因素。衍射光栅的色散实质上是基于单个刻划线对光的衍射 (单缝衍射) 和不同刻划线衍射光之间的干涉 (多缝干涉), 并且多缝干涉决定各种波长的出射方向, 单缝衍射则决定它们的强度分布。衍射光强分布为:

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

式中的 I_0 是一个常数, 描述的是主极大时的光强。 N 是光栅的周期数, 机器蚀刻的光栅往往能达到 $N \approx 10^4$ 以上。 $\frac{\sin^2 \mu}{\mu^2}$ 是单缝衍射对光强分布的影响, 称为衍射因子; $\frac{\sin^2(N\nu)}{\nu^2}$ 是多缝干涉对光强分布的影响, 称为多缝干涉因子。两个参数 μ, ν 分别满足如下定义:

$$\begin{aligned} \mu &\triangleq \frac{\pi b}{\lambda} (\sin \theta_0 \pm \sin \theta_m) \\ \nu &\triangleq \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta_0 \pm \sin \theta_m) \end{aligned} \quad (2)$$

b 是光栅有效部分宽度 (对透射光栅, 是透射缝宽度; 对反射光栅, 是反射部分宽度), d 是光栅常数, 刻画光栅的空间周期。据此, 我们也可以得到光栅衍射的方程:

$$d(\sin \theta_0 \pm \sin \theta_m) = m\lambda \quad (3)$$

m 是正整数, 表示光谱级次。满足上述光栅方程的角度 θ_0 处, 会有暗纹; 而在满足 $N \tan \nu = \tan N\nu$ 时, 会给出次极大位置。

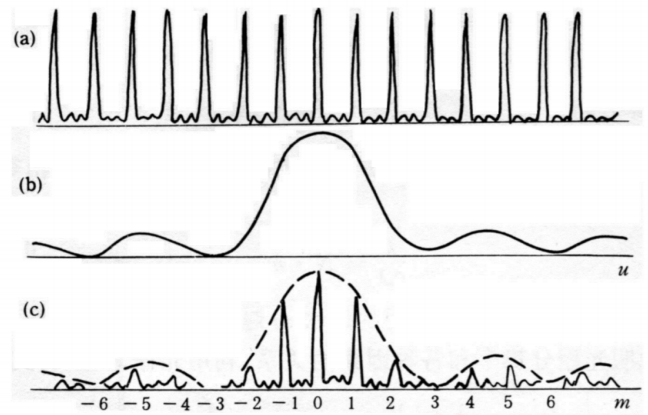


图 1: 衍射的光强分布, 从上至下依次是: 多缝干涉因子, 衍射因子, 光栅衍射 (叠加)

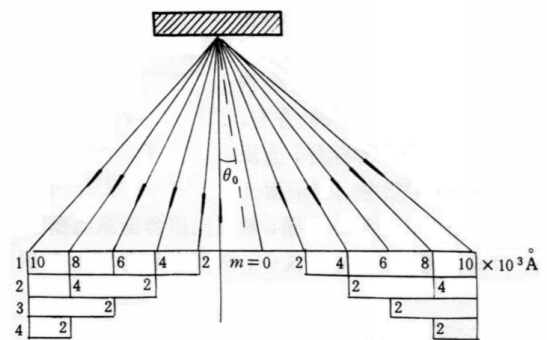


图 2: 复色光衍射的光谱分布

1.2 光的吸收和介质的吸收曲线 [3]

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。设有一束波长为 λ , 入射光强为 I_0 的单色平行光垂直入射到一块厚度为 d 的介质平板上。从界面 1 射回



的反射光的光强为 I_R ，从界面 1 向介质内透射的光的光强 I_1 ，入射到界面 2 的光的光强为 I_2 ，从界面 2 出射的透射光的光强为 I_T ，则定义介质板的光谱外透射率 T 和介质的光谱透射率 T_i 分别为：

$$T = \frac{I_T}{I_0}, T_i = \frac{I_2}{I_1} \quad (4)$$

光学 [3] 告诉我们，假设介质在透光方向是均匀的，透射率 T 和介质的厚度 d 有如下关系：

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

α 称为介质的线性吸收系数，由介质的固有属性和投射光的波长共同决定。实验中，常常将上面的式子取对数后，给出如下测定 α 的公式：

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

2 实验器材

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

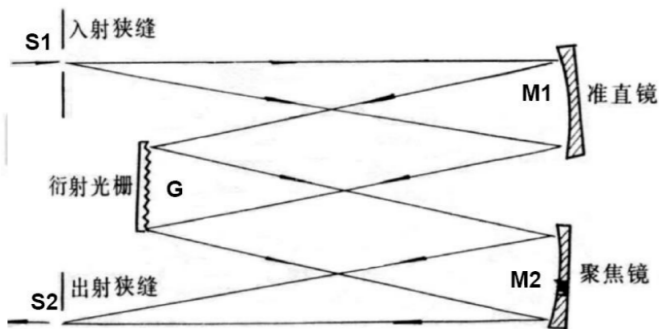


图 3: 反射式光栅光谱仪光路图

3 实验方案 [2, 1]

3.1 单色仪定标

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。

3.2 测量钠灯光谱

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。可计算求出钠的里德伯常数 R

3.3 红宝石晶体的发射和吸收光谱的测量

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。

4 实验结果

4.1 钠光谱测量

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 287V

实际测量的两个峰值在 588.987nm/589.600nm

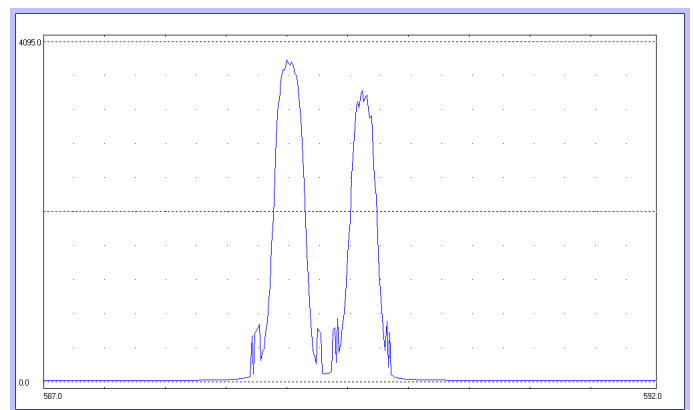


图 4: 钠主线系谱线

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 647V。

实际测量的两个峰值在 615.350nm/615.975nm

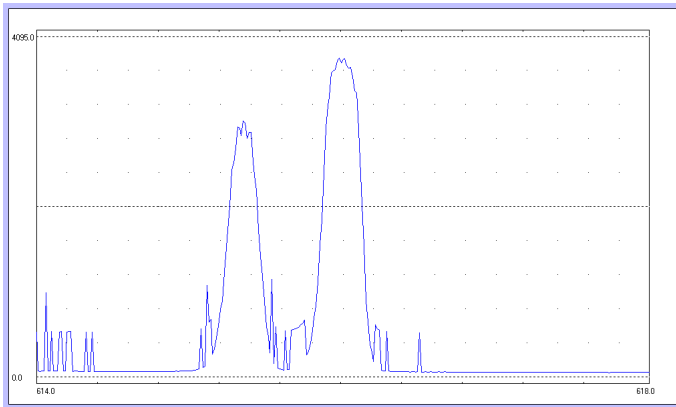


图 5: 钠锐线系谱线

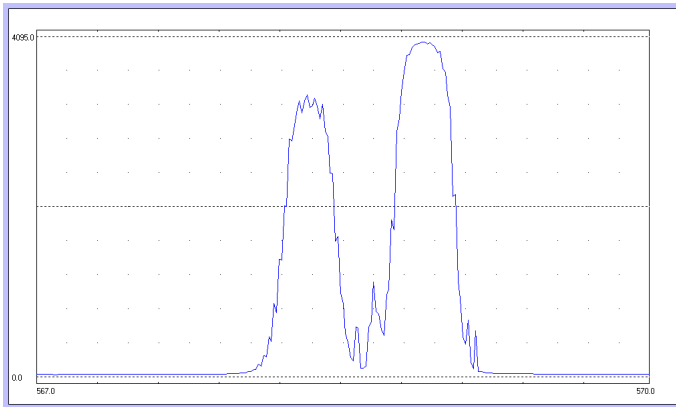


图 6: 钠漫线系谱线 1

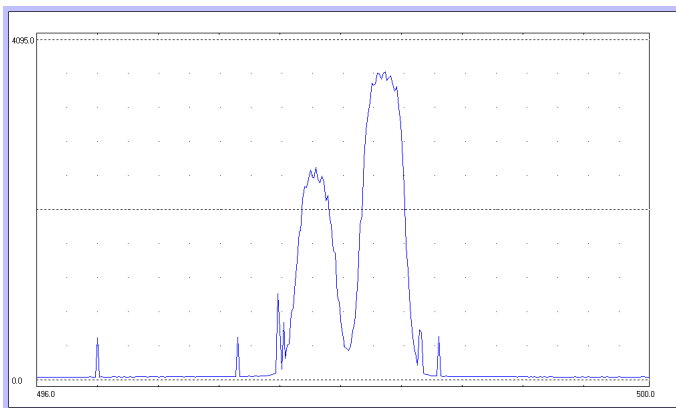


图 7: 钠漫线系谱线 2

钠漫线系 1 的波长为 568.3nm/568.86nm 测量时增益为 1, 狭缝宽度为 0.120mm, 负高压为 587V

钠漫线系 2 的波长为 497.78nm/498.2nm 测量时增益为 1, 狭缝宽度为 0.120mm, 负高压为 763V

实际测量中,漫线系 1 两个峰值在 568.325nm/568.900nm; 漫线系 2 两个峰值在 497.825nm/498.275nm.

4.2 红宝石晶体发射特性曲线

测量时增益为 1, 狭缝宽度为 0.120mm, 负高压为 617V. 实际测量的两个峰值在 692.050nm/693.462nm. 前者近似对应 $2A \rightarrow 4A2$ 能级的自发跃迁辐射; 后者近似对应 $E \rightarrow 4A2$ 能级的自发跃迁辐射. (考虑到光谱仪测量波长有偏差, 这里的对应关系由估计得到)

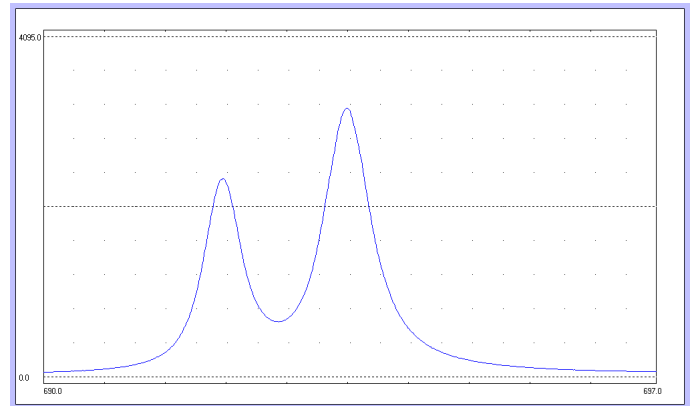


图 8: 红宝石晶体发射谱线

4.3 红宝石晶体吸收特性曲线

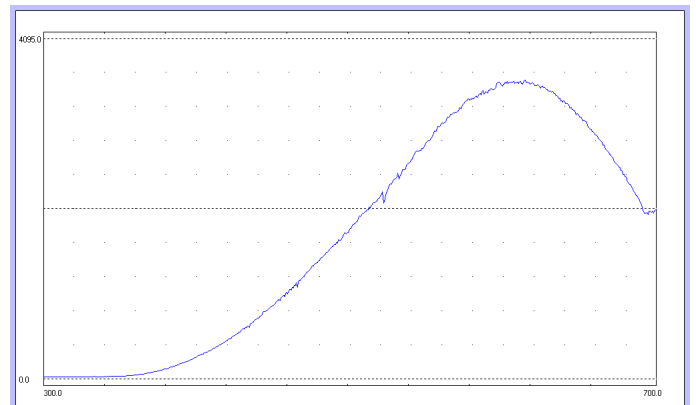


图 9: 红宝石晶体吸收谱线 (无红宝石)

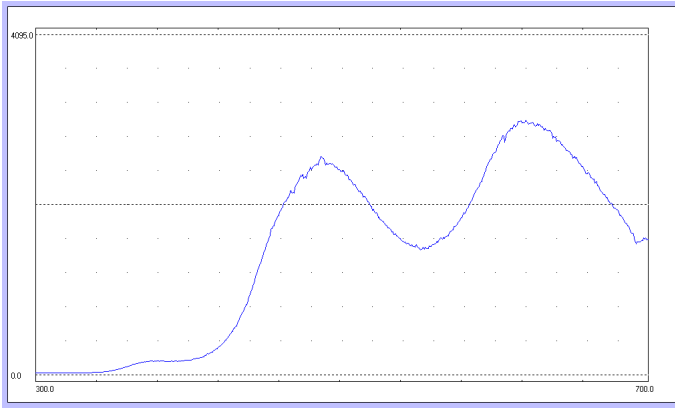


图 10: 红宝石晶体吸收谱线 (有红宝石)

主线系下, $R = 1.103 \times 10^7 \text{m}^{-1}$

锐线系下, $R = 1.117 \times 10^7 \text{m}^{-1}$

漫线系下, $n = 4$ 时 $R = 1.124 \times 10^7 \text{m}^{-1}$, $n = 5$ 时 $R = 1.123 \times 10^7 \text{m}^{-1}$

5.2 分辨率计算

谱线的分辨率定义为:

$$R \triangleq \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (8)$$

其中 $\Delta\lambda$ 是谱线峰的半高宽度。利用测得的数据, 分别给出:

5 数据处理

5.1 里德堡常数的计算

对于钠的三个线系, 分别满足如下公式:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda} &= \frac{R}{(3 - \Delta_s)^2} - \frac{R}{(3 - \Delta_p)^2} \\ \frac{1}{\lambda} &= \frac{R}{(3 - \Delta_p)^2} - \frac{R}{(5 - \Delta_s)^2} \\ \frac{1}{\lambda} &= \frac{R}{(3 - \Delta_p)^2} - \frac{R}{(n - \Delta_d)^2}, n = 4, 5 \end{aligned} \quad (7)$$

分别代入计算, 可得:

表 1: 分辨率计算值

| 线系 | 谱线波长 (nm) | 分辨率值 |
|-----|-----------|--------|
| 主线系 | 588.987 | 2338.4 |
| | 589.600 | 2175.1 |
| 锐线系 | 615.350 | 2196.6 |
| | 615.975 | 2480.3 |

5.3 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:

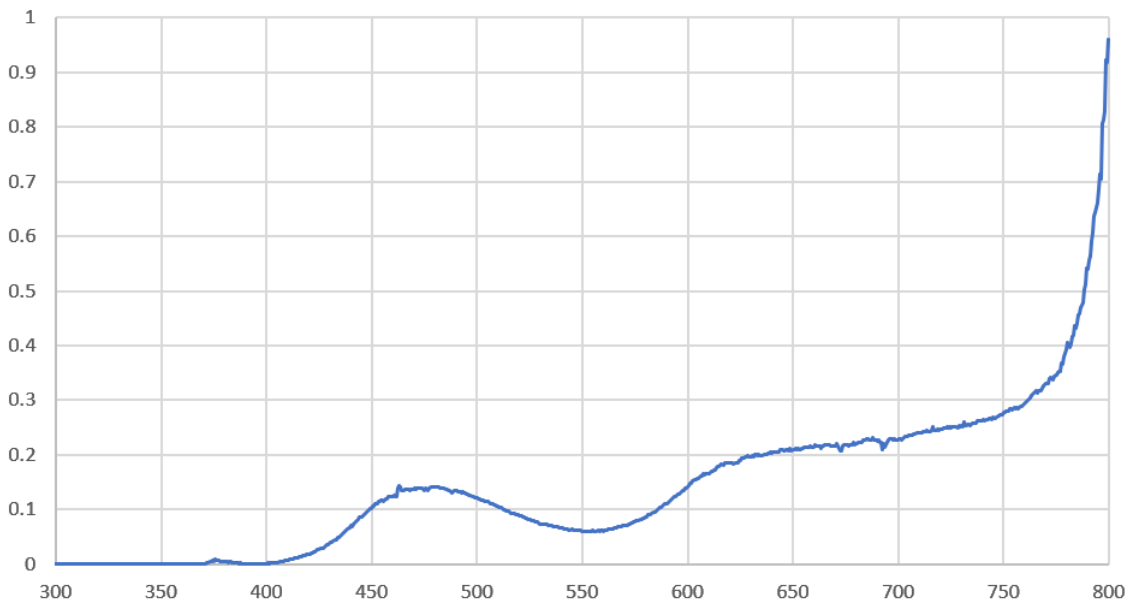


图 11: 红宝石晶体吸收特性曲线



6 思考与讨论 (思考题)

6.1 狭缝的最佳宽度

狭缝宽度对光强和分辨率的影响趋势是相反的，所以要综合考虑两个因素；光学的做法通常是令两者相等，利用瑞利判据可得 $d = 0.86\lambda f/D$

6.2 单色仪的分辨本领

根据光学，单色仪的理论分辨本领可用如下公式计算：

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

其中 N 为光栅周期数， m 为光谱级数。而在实际测量中，用 $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ 计算即可（实验原理部分已经描述过）

6.3 理论与实际分辨本领的差异

实际测量的分辨率是远小于理论分辨率的。理论计算公式中使用了一些近似方法，这些方法在实际测量中不一定完全成立；另外，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；光电倍增管本身的读出噪声、测量空间光信号的本底噪声也会影响实测结果。

6.4 光电倍增管的工作原理 [4]

光电倍增管是一种高灵敏度的光电转换器件，管子内部除了光电阴极和阳极外，在这两电极之间还设置了多个倍增电极（也称为打拿极），使用时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。光电阴极受光照射后释放出光电子，光电子在电场的作用下射向第一倍增电极，引起电子的二次发射，产生倍增，激发出更多的二次电子，然后在电场的作用下这些二次电子飞向下一个倍增电极，再次产生倍增，激发出比之前更多的二次电子，逐级如此接连不断地加倍转换、激发，使每个倍增极上产生的电子数不断地得到倍增。

负高压增强时，以上过程灵敏度越高，信号增强得越多，从而采集的灵敏度越高。

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。

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). Feb. 27, 2022. URL: <http://pems.ustc.edu.cn/uploads/project/20220227/d5e96b0a6ba324d9bd344fc4a7bf6c9a.pdf> (visited on 03/27/2023).
- [2] 吴泳华, 霍剑青, 浦其荣. 大学物理实验. 2nd ed. Vol. 第二册. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [3] 崔宏滨, 李永平, 康学亮. 普通物理学教程. 2nd ed. Vol. 光学. 北京: 科学出版社, 2015, pp. 314-340.
- [4] 康华光. 电子技术基础 (模拟部分) 6th ed. 北京: 高等教育出版社, 2013.