

单色仪定标与光谱测量

廖荣

中国科学技术大学 物理学院, 合肥 230026

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。本实验中涉及的为以光栅为色散元件的光栅单色仪。此次实验利用钠灯等标准光源对单色仪进行了定标, 并测量了红宝石的吸收和发射光谱。

关键词: 光栅单色仪, 闪耀光栅, 红宝石发光谱线

Monochromator calibration and spectral measurement

Rong Liao

School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

Abstract: A monochromator is an instrument that separates light of a very narrow wavelength range from a beam of electromagnetic radiation. The grating monochromator with grating as dispersive element is involved in this experiment. In this experiment, the monochromator was calibrated by standard light source such as sodium lamp, and the absorption and emission spectra of the ruby were measured.

Keywords: Grating monochromator, Shining grating, Ruby spectral line

1 实验原理

1.1 光栅光谱仪的原理

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。光栅由计算机软件控制步进电机驱动,可以获得较高的精度。

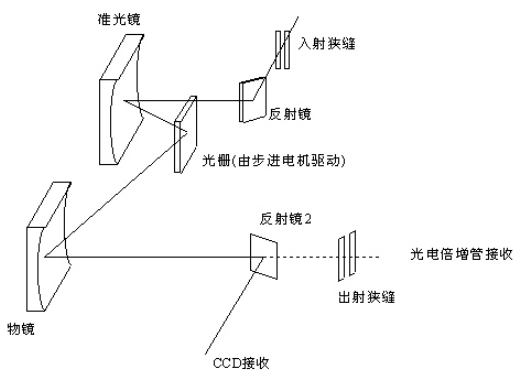


图 1: 光栅单色仪的结构和原理
[1]

从上图可知,光源或照明系统发出的光束均匀

地照亮在入射狭缝上,反射镜 1 位于离轴抛物镜的焦平面上,光通过准光镜变成平行光照射到光栅上,再经过光栅衍射返回,经过物镜会聚到出射狭缝,由于光栅的分光作用,从狭缝出射的光为单色光。当光栅转动时,从狭缝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。

1.2 闪耀光栅

实验仪器光栅单色仪的核心部件为闪耀光栅,其可以将一段光谱的衍射最大转移到其他衍射阶而非零阶。

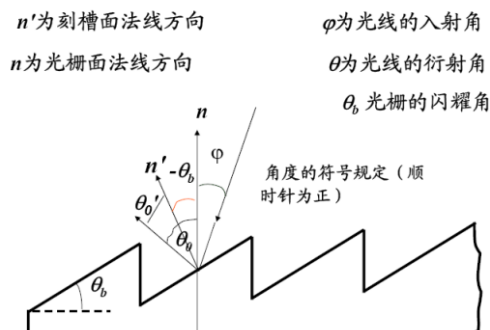


图 2: 闪耀光栅的结构和原理

当入射光与光栅面的法线 n 的方向的夹角为 ϕ 时, 光栅的闪耀角为 θ_b , 取一级衍射项时, 对于入射角为 ϕ , 而衍射角为 θ 时, 光栅方程式为:

$$d = (\sin\phi + \sin\theta) = \lambda \quad (1)$$

因此当光栅位于某一个角度时 (ϕ, θ 一定), 波长 λ 与 d 成正比。本次实验所用光栅 (每毫米 1200 条刻痕, 一级光谱范围为 $200\text{nm}—900\text{nm}$, 刻划尺寸为 $64 \times 64\text{mm}^2$)。当光栅面与入射平行光垂直时, 闪耀波长为 570nm 。由此可以求出此光栅的闪耀角为 21.58° 。当光栅在步进电机的带动下旋转时可以让不同波长以现对最强的光强进入出射狭缝, 从而测出该光波的波长和强度值。

1.3 红宝石晶体的发光原理及应用

光致发光材料红宝石晶体的化学成分为 $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Cr}^{3+}$, 它是 Al_2O_3 单晶中掺有少量的 Cr , Cr 的外层电子构型为 $3d^5 4s^1$ 。掺入 Al_2O_3 晶格后, Cr 失去外层三个电子, 变成 Cr^{3+} , 红宝石晶体的光谱是 Cr^{3+} 在 $3d$ 壳上 3 个电子发生能级跃迁的反应。 Cr^{3+} 属 $3d$ 电子组态, 4F 为基态光谱项, 2G 为第一激发态, 4P 为与基态自旋态相同的激发态, 由于 Cr^{3+} 处在八面体对称晶场中, 4F 晶场劈裂为三个能级 ${}^4T_1(F)$, ${}^4T_2(F)$ 和 4A_2 (基态); 2G 晶场劈裂为四个能级: 2T_1 , 2T_2 , 2E , 2A_1 . 4P 晶场劈裂为 ${}^4T_1(P)$ 。

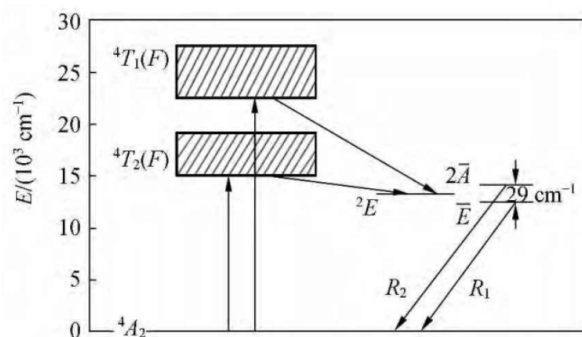


图 3: 红宝石晶体中 Cr^{3+} 能级及相关跃迁过程

从上图可以看出, 用两个强吸收带中波长的光作为激发光, 照射红宝石晶体, 能够使红宝石晶体中的 Cr^{3+} 吸收激发光的能量从基态 4A_2 激发到高能能级, 在返回跃迁到基态的过程中通过慢的自发

辐射释放能量而产生 2 条波长靠近的荧光 R_1 和 R_2 , 波长分别为 694.3nm 和 692.8nm 。[2]

天然红宝石可以应用在珠宝领域, 人工红宝石可以应用在工业领域, 作为研磨、抛光、精密铸造等材料进行使用。

2 实验器材

1. WDS-8 型组合式多功能光栅光谱仪 (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 0.01 mm)
2. 光电倍增管 (测量范围 $200-800\text{nm}$)
3. 氦氖激光器 (632.8 nm)
4. 低压钠灯 (589.0 nm 和 589.6 nm)
5. 半导体激光器 (532 nm)
6. 溴钨灯 ($360-2500\text{ nm}$)

3 实验步骤与结果

3.1 光栅单色仪的定标

借助已知波长的低压钠灯主线系 (589.0nm 和 589.6nm) 来对单色仪测量的波长进行标定, 设计光路为使用凸透镜会聚钠灯光线导入宽度为 0.1mm 的入射狭缝, 实验时调节光电倍增管的负高压值为 -350V , 得到原始光谱曲线如下。

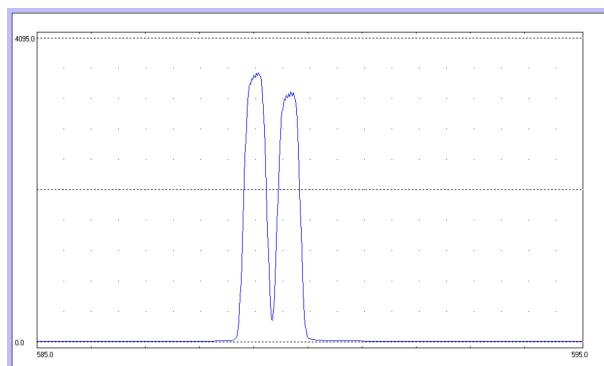


图 4: Na 主线系原始曲线

对原始数据进行分析, 得到两峰的测量波长为 589.0nm 和 589.6nm , 绘图如下。故本次实验无须设置偏移量。

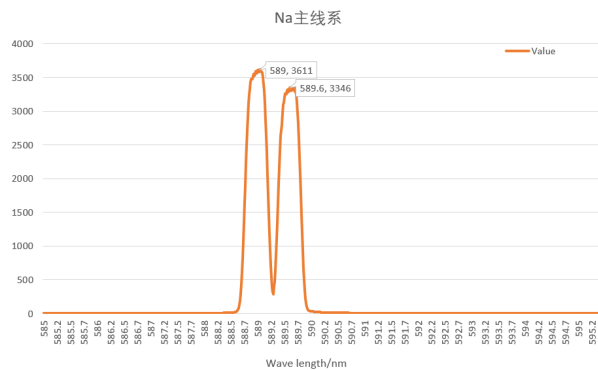


图 5: Na 主线系绘制曲线

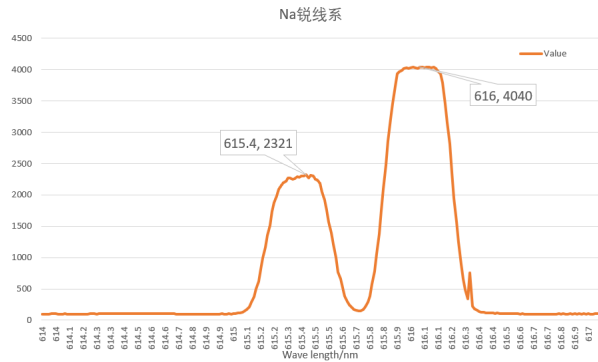


图 7: Na 锐线系绘制图线

3.2 测量低压钠灯的光谱

对 Na 原子光谱的主线系 (589.0nm 和 589.6nm)、漫线系 (568.3nm 和 568.86nm, 497.78nm 和 498.2nm) 和锐线系 (616.0nm 和 615.4nm) 进行测量, 并利用公式计算 Na 的里德堡常数。

对主线系, 数据与图片同定标实验, 测量数据为 589.0nm 和 589.6nm, 带入方程

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{(3 - \Delta s)^2} - \frac{R}{(3 - \Delta p)^2} \quad (2)$$

其中 $\Delta s = 1.35, \Delta p = 0.86$, 得到 $R_1 = 1.1398 \times 10^7 m^{-1}, R_2 = 1.1387 \times 10^7 m^{-1}$.

对锐线系, 原始数据和处理数据图如下

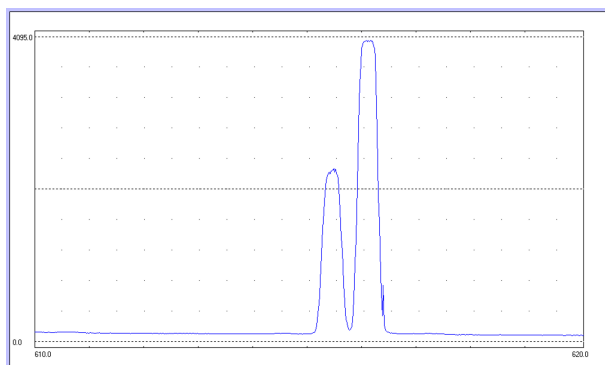


图 6: Na 锐线系原始曲线

测量数据为 616.0nm 和 615.4nm, 带入方程

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

其中 $\Delta s = 1.35, \Delta p = 0.86$, 得到 $R_3 = 1.1340 \times 10^7 m^{-1}, R_4 = 1.1329 \times 10^7 m^{-1}$.

对漫线系第一组, 原始数据和处理数据图如下

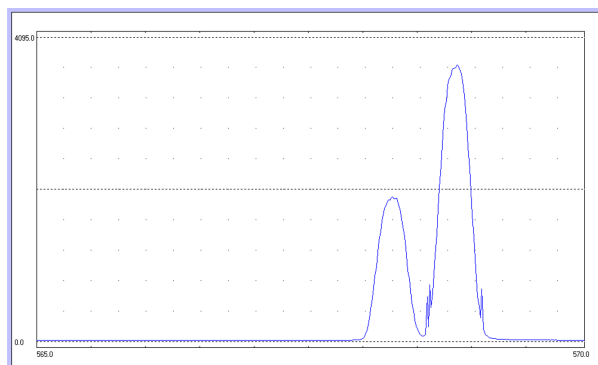


图 8: Na 漫线系 1 原始曲线

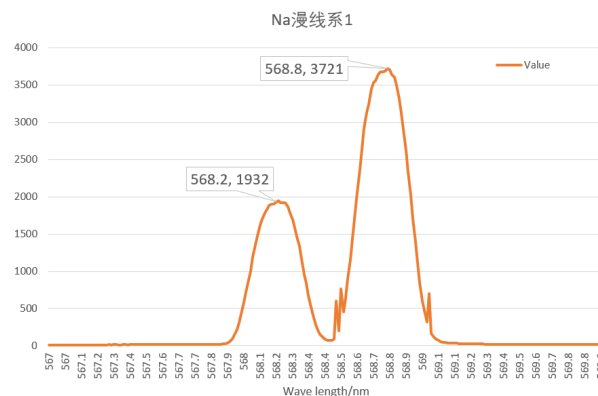


图 9: Na 漫线系 1 绘制图线

测量数据为 568.2nm 和 568.8nm，带入方程

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

其中 $\Delta d = 0.01, \Delta p = 0.86$ ，得到

$$R_5 = 1.1315 \times 10^7 m^{-1}, R_6 = 1.1303 \times 10^7 m^{-1}.$$

对漫线系第二组，原始数据和处理数据图如下

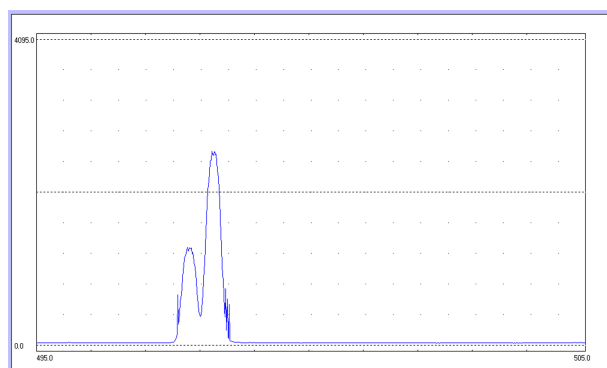


图 10: Na 漫线系 2 原始曲线

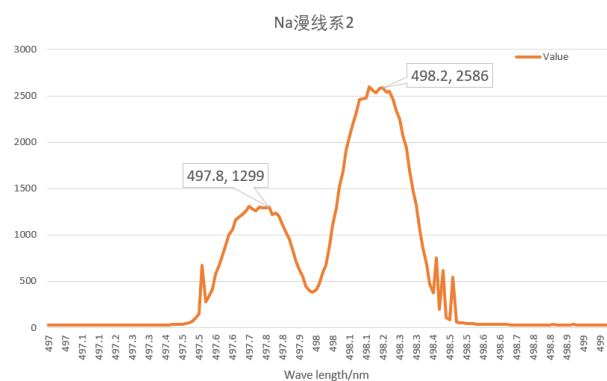


图 11: Na 漫线系 2 绘制图线

测量数据为 497.8nm 和 498.2nm，带入方程

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

其中 $\Delta d = 0.01, \Delta p = 0.86$ ，得到

$$R_7 = 1.1273 \times 10^7 m^{-1}, R_8 = 1.1264 \times 10^7 m^{-1}.$$

综上，取平均计算得到 $R = 1.1326 \times 10^7 m^{-1}$

3.3 红宝石晶体发射光谱的测量

借助半导体激光器 (532nm) 作为激发光源，设计光路为激光束正入射红宝石晶体的光学面，透镜

将晶体发射的光汇聚入射宽度为 0.1mm 的入射狭缝，实验时调节光电倍增管的负高压值为 -500V，得到原始光谱曲线如下。

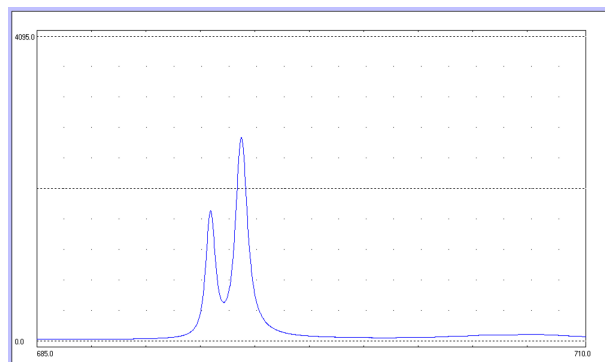


图 12: 532nm 激光器 (50mW) 激发红宝石发射原始光谱

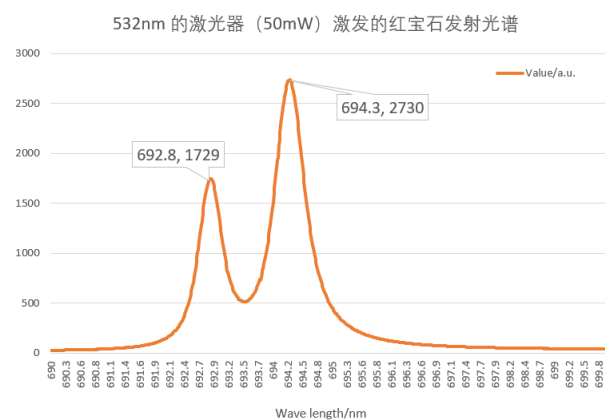


图 13: 532nm 激光器 (50mW) 激发红宝石发射绘制光谱

得到的发射光波长为 694.3nm 和 692.8nm，和前述实验原理部分的理论值吻合。

3.4 红宝石晶体的吸收光谱的测量

使用功率为 35W，波长范围为 360-2500nm 的溴钨灯作为实验光源，透镜焦距 $f = 100mm$ 。首先获取入射光强度，即溴钨灯的发射光谱，光路中不放置红宝石晶体，溴钨灯发射光经过透镜会聚入狭缝。再在同等测量条件下，将红宝石晶体放置在光栅单色仪入射狭缝与透镜之间，经过透镜会聚光束正入射红宝石晶体光学面，测量放入红宝石后的出射光谱光强数据。两项数据相减，得到红宝石晶体的吸收光谱。[3]

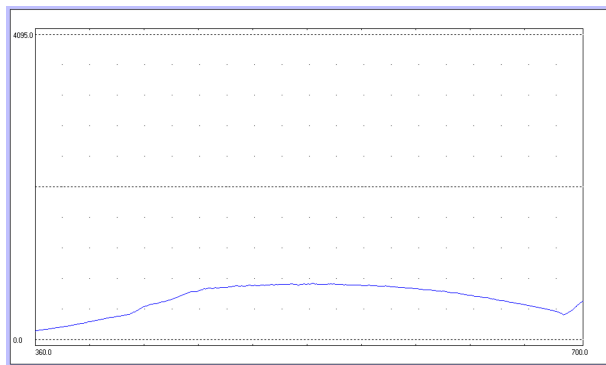


图 14: 溴钨灯的发射光谱原始曲线

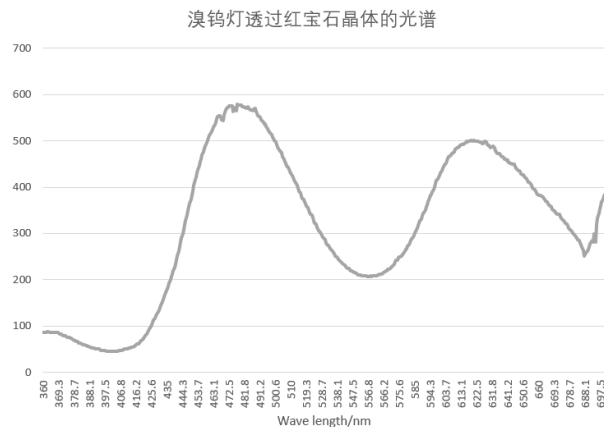


图 17: 溴钨灯透过红宝石晶体的光谱绘制曲线

两项数据按以下公式处理, 其中 $O.D$ 是吸光度, I_0 是入射光强度, I 是出射光强度:

$$O.D = \log_{10}(I_0/I) \quad (6)$$

数据处理后得到红宝石晶体吸收光谱如下:

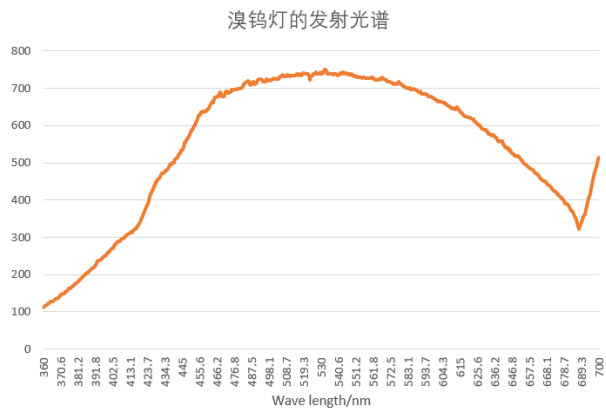


图 15: 溴钨灯的发射光谱绘制曲线

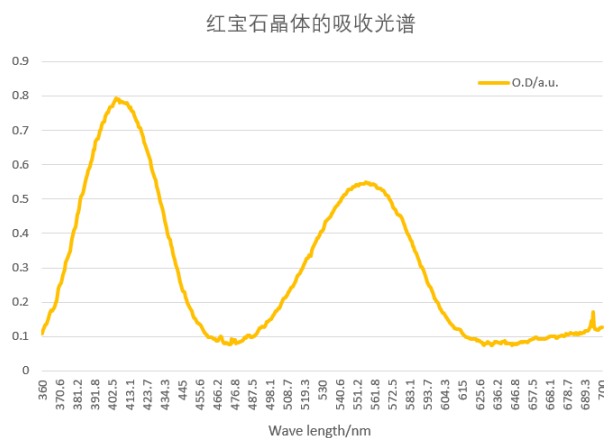


图 18: 红宝石晶体的吸收光谱

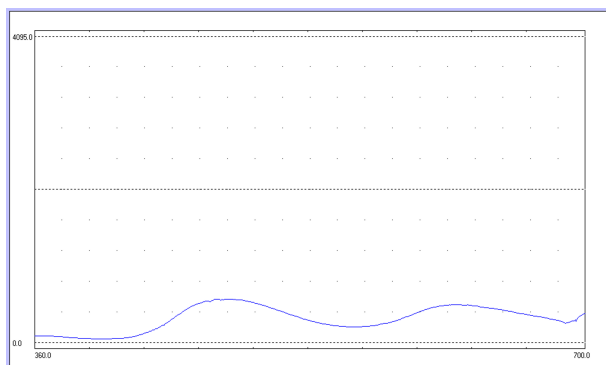


图 16: 溴钨灯透过红宝石晶体的光谱原始曲线

4 总结与讨论 (思考题)

4.1 如何求出入射狭缝的最佳宽度

狭缝宽度影响分辨率, 狭缝越宽, 其分辨率越低。狭缝宽度也不能太小, 因为探测器灵敏度有下限, 进入能量太低, 探测器没有相应, 同时由于噪声的影响, 能量太低, 信噪比会很差。

两相协调，取定的最佳宽度为

$$a_n = 0.86 \frac{\lambda f}{D} \quad (7)$$

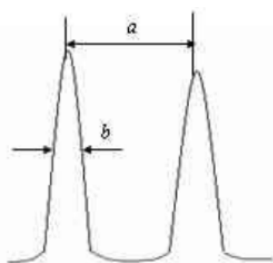
其中 D 为光栅和抛物镜的口径。

4.2 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？

理论分辨本领使用如下公式计算，其中 m 为干涉级次， $m=1$ ， N 为光栅的总线条数。

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

实际分辨本领的测量和计算如下：



$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \frac{b}{a} \delta\lambda \\ \delta\lambda &= \lambda_2 - \lambda_1 \\ \lambda &= (\lambda_2 + \lambda_1) / 2 \\ R &= \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \end{aligned}$$

图 19: 单色仪实际分辨本领计算

4.3 比较单色仪的理论分辨本领与实际分辨本领，说明两者差距大的原因

差距大的原因为实验中光学系统的像差和调整误差无法避免，而且有杂散光和噪声的影响，加上光源的谱线由于各种效应发生增宽，所以实际的谱线半角宽度远大于理论值，导致实际的分辨率比理论分辨率小得多。

4.4 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？

光线倍增管的工作原理：当光子打到光电倍增管的光电阴极 K 上时，由于光电效应会产生一些电子，这些光电子在光电倍增管中的电场作用下飞向阳极 A ，在阳极和阴极之间还有 n 各电极叫做倍增极，极间也有一定的电压（几十到百伏），在极间电压的作用下飞向阳极 A 的光电子被一级一级加速，在加速过程中它们以高速轰击倍增极，使倍增极产生二次电子发射，这样电子的数目就会大大增加，并逐级递增，最后到达阳极的电子就会很多，形成很大的阳极电流。副高压绝对值增大会使同样数量的光子最后形成更大的阳极电流，故灵敏度会提高。

4.5 说明溴钨灯、钠灯和汞灯的光谱的区别和道理？

钨灯的光谱较为连续且范围很大，而钠灯和汞灯的光谱则是分立的。原因是钠灯和汞灯靠高温气体发光，而钨灯靠高温固体发光。

参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 单色仪和光栅光谱仪（实验讲义）.
- [2] 朱玲，郑虹，王中平，张权，张增明，孙腊珍. 使用光栅单色仪测量红宝石晶体的吸收和发射光谱. 物理实验, 2014,34(11):10-13.
- [3] 谢行恕，康世秀，霍剑青. 大学物理实验，第二册，第二版. 高等教育出版社，北京，2005.