

单色仪定标与光谱测量

卜一楠

PB22071444

22 级少院 01 班 2023 年 10 月 30 日

摘要 光栅光谱仪是利用光栅衍射的方法获得单色光的仪器，具有比棱镜单色仪更高的分辨率和色散率，光谱的线性也更好。本实验中利用光栅光谱仪作为色散元件，使用钠灯光谱对其标定。测量钠灯光谱，再利用氦氖激光器、溴钨灯和红宝石来测量红宝石的发射、吸收光谱。

1 引言

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。按照色散元件的不同可分为两大类：以棱镜为色散元件的棱镜单色仪和以光栅为色散元件的光栅单色仪。棱镜的色散起源于棱镜材料折射率对波长的依赖关系，对多数材料而言，折射率随着波长的缩短而增加（正常色散），及波长越短的光，在介质中传播速度越慢。由于棱镜光谱是非线性的，人们开始研究光栅光谱仪。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，它也可以从复合光的光源（即不同波长的混合光的光源）中提取单色光。

2 实验目的

了解光栅单色仪的结构以及工作原理并熟练掌握其使用方法；掌握调节光路准直的基本方法和技巧，利用钠灯等标准光源对单色仪进行定标；测量红宝石、稀土化合物的吸收和发射光谱，加深对物质发光光谱特性的了解；测量滤波片和溶液的吸收曲线，掌握测量其吸收曲线或透射曲线的原理和方法。

3 实验原理

1. 衍射光栅

以衍射光栅中的反射光栅为例。在一块平整的玻璃或者金属片的表面刻划出一系列平行、等宽、等距离的刻线，就制成了一块透射式或者反射式的衍射光栅，如图 1 所示反射式衍射光栅：图中 b 为刻划宽度， d 为两相邻刻划线间的距离，称为光栅常数。一般的光栅的刻划密度在每毫米数百线到数千线之间，一块中等尺寸的光栅总的刻划线在 $10^4 \sim 10^5$ 左右。

(1) 工作原理：

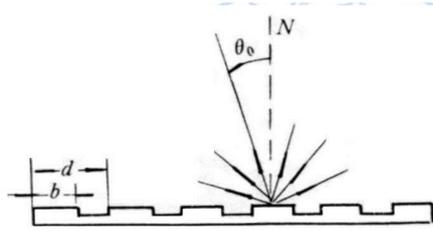


Figure 1: 反射式衍射光栅



Figure 2: 刻线反射式衍射光栅

入射光照射在光栅上时，光栅上每条刻划线条都可看成为一宽度极窄的线状发光源。由于衍射效应，这种极窄光源发出的光分布在空间很大的角度范围内。但是不同刻划线条发出的光有一定的相位差，由于干涉效应，使入射光中不同波长成分分别出现在空间不同方向上，也就是说入射光发生了色散。

(2) 光栅方程：

设有一束光以入射角 θ_0 射向一块衍射光栅，则只有满足下式的一些特殊角度 θ_m 下，才有光束衍射出来

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

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。

复色光入射时，同样产生 $(2m+1)$ 个级次的衍射光。但是在同一级衍射光中，波长不同的光衍射角又各不相同，长波长的衍射角大。

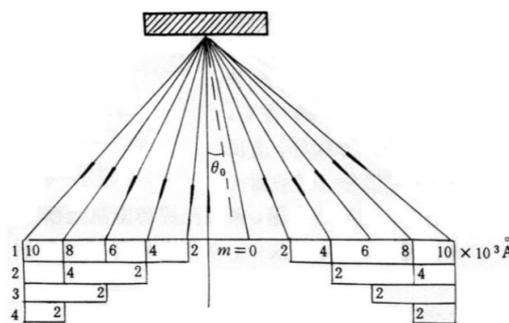


Figure 3: 复色光入射下衍射光栅各级光谱

从图中下部给出的光栅光谱可以看出，各级光谱之间有一定的重叠。

(3) 强度分布：

按照多缝衍射的理论，在强度为 I_0 的入射光照射下，光栅衍射光的强度分布为：

$$I = I_0 A(\mu) \cdot B(\nu) = I_0 \frac{\sin^2 \mu}{\mu^2} \cdot \frac{\sin^2(N\nu)}{\sin^2 \nu}$$

式中：

$$\mu = (\pi b/\lambda)(\sin \theta_0 + \sin \theta_m), \nu = (\pi d/\lambda)(\sin \theta_0 + \sin \theta_m)$$

$A(\mu)$ 为单缝衍射对光强的分布影响，称为单缝衍射因子； $B(\nu)$ 为多缝干涉对光强分布的影响，称为多缝干涉因子。

2. 光栅的色散和分辨率：

从光栅方程可以得到光栅的角色散为：

$$\frac{d\theta_m}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta_m}$$

光栅的角色散与衍射级次成正比，故使用较高的衍射级次可以得到较大的角色散，对于给定的光栅和级次，衍射角越大，角色散越大。

光栅衍射谱线的角宽度由多缝干涉因子决定，为： $\Delta\theta_m = \frac{\lambda}{Nd \cos \theta_m}$ 。根据瑞利判据，角色散大于等于半角宽度，得到光栅分辨率为 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = N_m$ 。上式说明，光栅的总刻划线数 N 越多，使用的级数 m 越高，则分辨率越高。利用光栅方程得出：

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{W}{\lambda}(\sin \theta_0 + \sin \theta_m)$$

式中 $W = Nd$ 为光栅的几何宽度。上式说明，不管 N 多大，光栅的分辨率最高只能达到 $2W/\lambda$ 。

4 实验仪器

光栅光谱仪是一个光谱分析研究的通用设备，其元件包括：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，计算机及软件系统。照明系统发出的光束均匀地照亮在入射狭缝 S_1 上， S_1 位于离轴抛物镜的焦平面上，光通过 M_1 变成平行光照射到光栅上，再经过光栅衍射返回到 M_1 ，经过 M_2 会聚到出射狭缝 S_2 ，由于光栅的分光作用，从 S_2 出射的光为单色光。当光栅转动时，从 S_2 出射的光由短波到长波依次出现。 S_2 出射狭缝位置连接信号接收设备，对出射光谱进行数据采集分析。

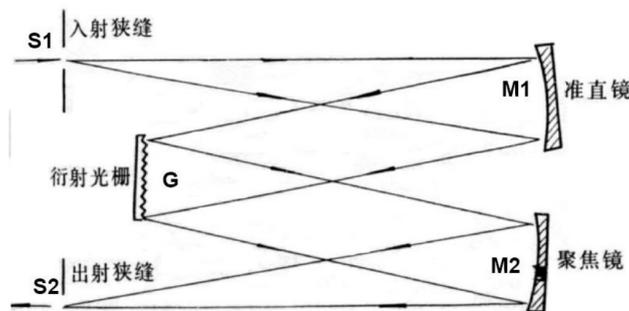


Figure 4: 光栅单色仪的结构和原理

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 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。

5 实验步骤

定标：利用低压钠灯（589.0 nm 和 589.6 nm）校正波长位置误差，使用透镜把光导入入射狭缝，调整负高压值，并利用采集程序获取双光谱线完全分离开的光谱曲线。

测量钠灯光谱：操作同定标过程，可测得主线系的 589.0 nm 和 589.6 nm，锐线系的 616.0 nm 和 615.4 nm 以及漫线系的两对谱线 568.3 nm 和 568.86 nm，497.78 nm 和 498.2 nm。

红宝石发射光谱：用氦氖激光器照射红宝石立方体透光面，使用透镜将立方体侧面发出的红光聚焦至光谱仪狭缝上，测量红宝石发射谱。

红宝石吸收光谱：使用溴钨灯（360-2500 nm）照明，使用透镜将光聚焦至红宝石透光面，再将透过后的光照射在狭缝上，记录光谱；移去红宝石，再次记录光谱，将两次的强度相减，得到红宝石吸收光谱。

6 测量记录

原始数据记录见“附件：原始数据”。

6.1 单色仪定标

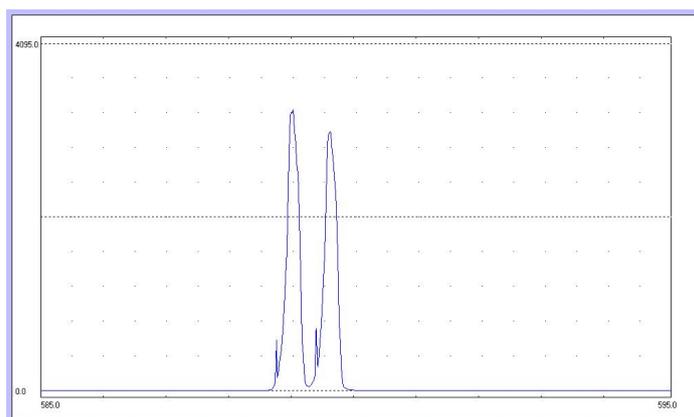


Figure 5: 定标后钠灯主线系谱线

将透镜置于钠灯和狭缝之间，调整透镜位置，直至钠灯发出的光会聚到光谱仪的狭缝上。负高压调整至-425V。在程序中输入偏移量矫正后光谱如图所示，重新扫描光谱，从数据中读出左侧谱线的波长为 589.00nm，即校正完成。

6.2 低压钠灯的光谱

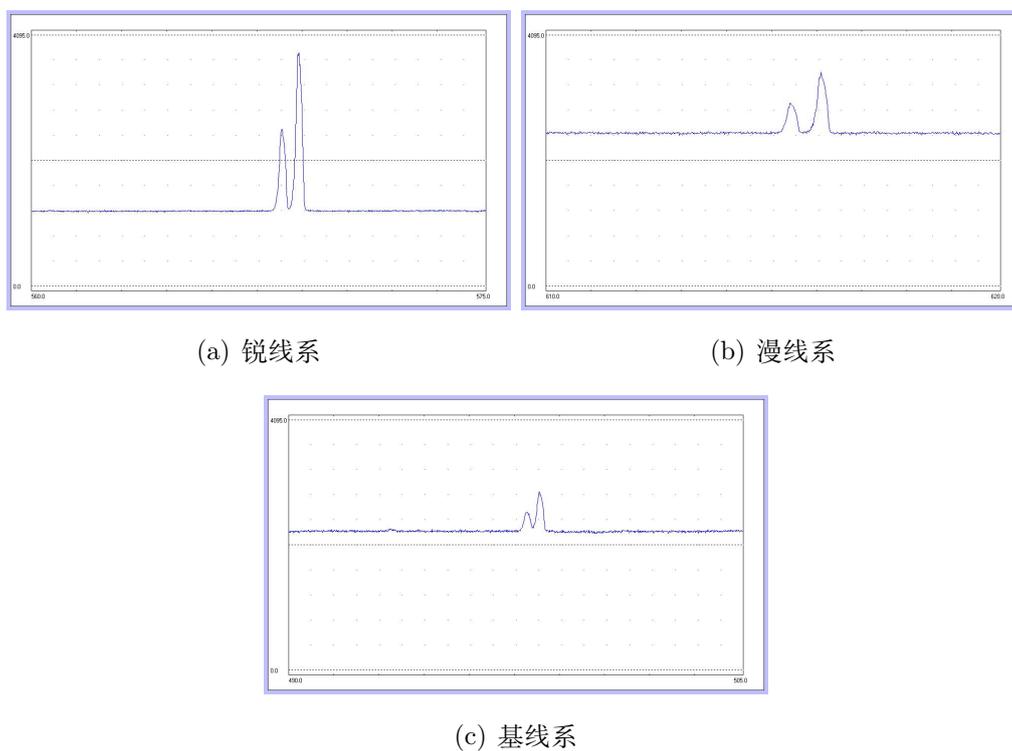


Figure 6: 低压钠灯的光谱

对应的负高压分别为-880V、-800V、-890V。

6.3 红宝石发射光谱

用氩氟激光器照射红宝石立方体透光面，使用透镜将立方体侧面发出的红光聚焦至光谱仪狭缝上，红宝石内 Cr^{3+} 吸收绿光，其中电子发生能级跃迁能量升高变得不稳定，然后再次跃迁释放能量发出红光。

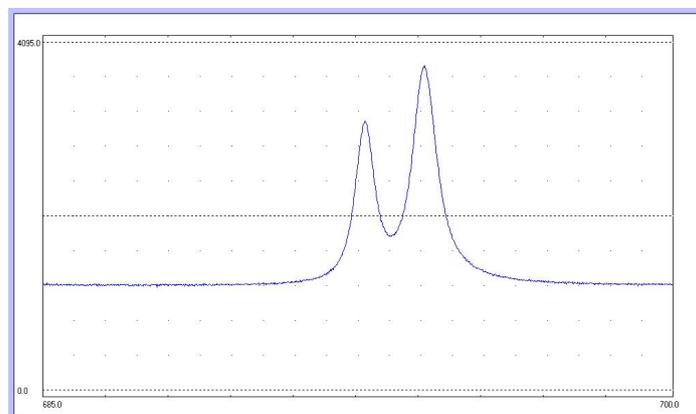


Figure 7: 红宝石发射光谱

7 分析与讨论

7.1 数据处理与误差分析

7.1.1 低压钠灯光谱

读取 txt 文件中数据：

Table 1: 低压钠灯的光谱数据

Na 光谱线系	主线系		锐线系		漫线系		基线系	
测量值 (nm)	589.0	589.6	616.0	615.3	568.2	568.8	497.8	498.2
理论值 (nm)	589.00	589.60	616.00	615.39	568.30	568.86	497.78	497.20
测量峰值	3312.0	3029.0	3484.0	2982.0	2552.0	3803.0	2581.0	2914.0
误差	0.000%	0.000%	0.000%	0.016%	0.018%	0.011%	0.004%	0.201%

主线系光谱公式：

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

对于主线系，由于短波成分和长波成分强度相当，因此式中 λ 取加权平均 $\lambda = 589.29nm$ ，得到里德堡常数为 $R = 1.1393 \times 10^7 m^{-1}$ 。

锐线系光谱公式：

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

其中，短波波长和长波波长比为 2982:3484。计算波长加权平均为 615.68nm，代入公式得里德堡常数 $R = 1.1334 \times 10^7 m^{-1}$ 。

漫线系光谱公式：

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

其中短波与长波成分强度比为 2552:3803，式子中 λ 取加权平均为 568.56nm，得到里德堡常数为 $R = 1.1307 \times 10^7 m^{-1}$ 。

基线系光谱公式：

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

其中短波成分与长波成分为 2581:2914，波长取加权平均为 498.01nm，代入公式得里德堡常数 $R = 1.1268 \times 10^7 m^{-1}$ 。

对计算得到的里德堡常数取平均得到 $R_{Na} = 1.1319 \times 10^7 m^{-1}$ ，对比标准值 $1.0974 \times 10^7 m^{-1}$ ，相对误差为 3.14%。

7.1.2 红宝石发射光谱

所用负高压值为-751V.

分析数据得红宝石发射光谱分别为 692.6nm 和 694.0nm, 理论峰值波长 692.8nm 和 694.3nm, 相对误差为 0.0003% 和 0.0004%.

7.2 实验讨论

实验者发现随着负高压数值增加, 测得的谱线起始位置上移。分析可能原因有:

1. 实验室其他光源干扰: 随着负高压增加, 谱线起始位置上移。故由光电倍增管原理推测可能为实验室其他光源产生干扰。

2. 狭缝过窄: 实验者将狭缝调宽后发现谱线起始位置下移, 故推测可能由于狭缝过窄导致谱线起始位置上移。

8 思考题

1. 如何求出入射狭缝的最佳宽度?

入射狭缝越宽, 狭缝入射光的相干性越差, 导致分辨率变差, 但透过的光越多, 导致分辨率变高。让分辨率与光强相等时最好, 取 $a = a_n = 0.86\lambda f/D$ 。

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?

光栅分辨率为 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = Nm$ 。利用光栅方程改写为: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{W}{\lambda}(\sin\theta_0 + \sin\theta_m)$, 式中 $W = Nd$ 为光栅的几何宽度, 其余项均可测量。

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理论分辨本领约为 50000。实际上, 钠光灯 589nm 光谱半展宽为 0.30nm, 得到实际分辨本领约为 2000。由于单色仪对不同色光的分辨本领不同, 以及实验中狭缝宽度等参数未能达到最佳, 因此单色仪实际分辨率与理论值相差较大。

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?

入射光在每个光电极上都会激发出更多的电光子, 设入射光在经光电极反射后变为了 α 倍, 则光电倍增管的放大效果 $\beta = \alpha^n$ 。而 $\alpha \propto V$, 故 $\beta \propto V^n$ 。由于信号在光电倍增管中呈指数放大, 所以负高压绝对值增大时采集的灵敏度显著提高。

5. 说明溴钨灯、钠灯和汞灯的光谱的区别和道理?

溴钨灯的光谱是连续谱, 钠灯和汞灯光谱是分立谱。这是因为钨灯由原子电离出的电子所产生的, 电子具有连续的能量分布, 所以光谱连续; 汞灯是由原子内部电子发生能级跃迁造成的, 所以光谱是分立的。

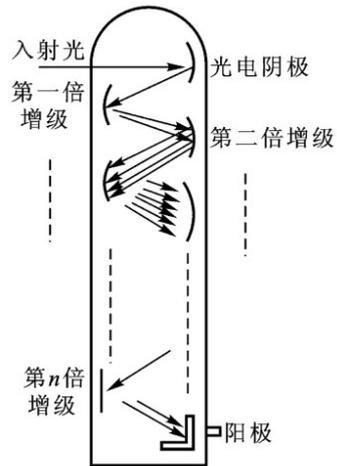


Figure 8: 光电倍增管原理图

References

- [1] 孙晴, 姚[国], 张权. 由钠原子光谱测定里德伯常数 [C]//. 大珩先生九十华诞文集暨中国光学学会 2004 年学术大会论文集.,2004:2568-2570.
- [2] 柯惟中, 张颂东, 刘海林.(1994). 用双光栅单色仪做钠原子光谱实验. 大学物理 (11). doi:10.16854/j.cnki.1000-0712.1994.11.009.
- [3] 朱玲, 郑虹, 王中平, 张权, 张增明 & 孙腊珍.(2014). 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 (11),10-13.

附件

原始数据