

实验 CA3 原子的发射和吸收光谱观测分析

【实验目的】

1. 学习光学多通道分析器的使用。
2. 观测钠原子光谱，了解碱金属原子光谱的一般规律。
3. 观测汞原子光谱，了解中外层电子与原子核相互作用。
4. 观测多种光源的发射光谱，了解线光谱与连续谱的异同

【仪器用具】

光源，滤光片，测控计算机
光谱观测和分析仪器：光纤光谱仪

【原理概述】

1 碱金属原子光谱

碱金属和氢原子一样，核外只有一个价电子，但在碱金属原子中除了一个价电子外，还有封闭在内的壳层电子，这些内封闭的电子和原子核统称为原子实。当价电子贯穿原子实时，会产生异于氢原子光谱的一系列特点。

钠属碱金属原子类。碱金属原子和氢原子一样，都只有一个价电子。但在碱金属原子中除了一个价电子外，还有内封闭壳层的电子，这些内封闭壳层电子与原子核构成原子实。价电子是在原子核和内部电子共同组成的力场中运动。原子实作用于价电子的电场与点电荷的电场有显著的不同。特别是当价电子轨道贯穿原子实时（称贯穿轨道），这种差别就更为突出。因此，碱金属原子光谱线公式为：

$$\tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{n_2^{*2}} - \frac{1}{n_1^{*2}} \right) = \frac{R}{(n' - \mu_{l'})^2} - \frac{R}{(n - \mu_l)^2} \quad (1)$$

其中 $\tilde{\nu}$ 为光谱线的波数；R 为里德堡常数。

n' 与 n 分别为始态和终态的主量子数。

n_2^* 与 n_1^* 分别为始态和终态的有效量子数。

l' 与 l 分别为该量子数决定之能级的轨道量子数。

$\mu_{l'}$ 与 μ_l 分别为始态和终态的量子缺（也称量子改正数，量子亏损）。

根据旧的玻尔理论，在电子轨道愈接近原子中心的地方， μ 的数值愈大。当轨道是贯穿轨道时， μ 的数值还要大些。因为这时作用在电子上的原子核的有效电荷 Z_{eff} 有很大程度的

改变。在非常靠近原子核的地方，全部核电荷作用在电子上。而距离很远的，原子核被周围电子屏蔽，以致有效核电荷 $Z_{eff} \rightarrow 1$ 。因此 s 项的 μ 值最大，而对 p 项来说就小一些，对于 d 来说还更小，由此类推。因而量子数 μ 的大小直接反映原子实作用于价电子的电场与点电荷近似偏离的大小。

对于钠原子光谱分如下四个线系：

$$\begin{aligned} \text{主线系: } \tilde{\nu} &= np \rightarrow 3s & (n=3, 4, 5, \dots) \\ \text{锐线系: } \tilde{\nu} &= ns \rightarrow 3p & (n=4, 5, 6, \dots) \\ \text{漫线系: } \tilde{\nu} &= nd \rightarrow 3p & (n=3, 4, 5, \dots) \\ \text{基线系: } \tilde{\nu} &= nf \rightarrow 3d & (n=4, 5, 6, \dots) \end{aligned} \quad (2)$$

对于某一线系谱线的波数公式可写为：

$$\tilde{\nu} = A_{n'l'} - \frac{R}{(n - \mu_l)^2} \quad (3)$$

其中 $A_{n'l'}$ 为常数，称为固定项。

从钠原子光谱中，可以看出各个线系的一些明显特征，这些特征也为其它碱金属原子光谱所具有。

各线系的共同特点是：

1. 同一线系内，愈向短波方向，相邻谱线的波数差愈小，最后趋于一个极限——连续谱与分立谱的边界。这是由于能量愈高，能级愈密，最后趋于连续。
2. 在同一线系内，愈向短波方向，谱线强度愈小，原因是能级愈高，将原子从基态激发到那一状态也愈不容易。

各线系的区别是：

1. 各线系所在的光谱区域不同。主线系只有 $\tilde{\nu} = 3p \rightarrow 3s$ 的二条谱线（钠双黄线）是在可见区，其余在紫外区。又由于主线系的下能级是基态（ $3S_{1/2}$ 能级），因此当具有连续谱的光谱通过钠原子蒸气经过分光后，在连续光谱的背景上将出现钠原子主线系的吸收光谱。在光谱学中，称主线系的第一组线（双线）为共振线，钠原子的共振线就是有名的黄双线（589.0nm 和 589.6nm）。

锐线系和漫线系由于相应的能量差比主线系小，它们的谱线除第一条线（ $\tilde{\nu} = 4s \rightarrow 3p$ ； $\tilde{\nu} = 3d \rightarrow 3p$ ）在红外区外，其余都在可见区。其基线系的能量差更小，在红外区。

2. s 能级是单重的， p 、 d 、 f 能级由于电子自旋与轨道运动作用引起谱项分裂，它们是

双重的。这些双重分裂随能级增高而变小。根据选择定则，主线系和锐线系是双线的。漫线系和基线系是复双重线的。主线系的双线是由于 $3s$ 能级与 $3p, 4p \cdots$ 各能级间的跃迁产生的，双线的距离决定于 p 能级的分裂大小，因此愈向短波方向，双线间的波数差愈小。而锐线系则不同，它是内 $3p$ 能级与各 s 能级之间的跃迁产生的，因此锐线系各双线波数差都相等。

3. 从谱线的外表上看，主线系强度较大，锐线系轮廓清晰，漫线系显得弥漫，一般复双重线连成一片。

具体可以参考《基础物理实验（沈韩主编）》中第 11 章 318-319 页。

2 单色仪色散系统

拍摄光谱的仪器称为光谱仪。根据分光系统的不同，分为棱镜单色仪和光栅单色仪。由于两光谱线很靠近，所以摄谱仪的色散率要大，以便分辨开两光谱。常用的光谱仪有棱镜光谱仪（如 QS-20 型）和光栅光谱仪（如 WPG-100 型，其一级光谱色散率约为 0.8nm/mm ）。前者以棱镜作为色散元件进行分光，后者采用反射式平面闪烁光栅作色散元件进行分光。

为了测量原子发射光谱线的波长，需要在光谱底片上同时并列拍摄标准光谱。对照标准光谱图，利用线形内插值法，从靠近某一条谱线的两条已知标准谱线的波长，即可求出这谱线的波长。

光谱仪测量波长的准确度由光谱仪分辨率决定，具体光谱分辨率的定义可以参考《基础物理实验（沈韩主编）》中第 11 章 319 页。

3 光谱仪和光学多通道分析仪

将单色仪发出的光线记录下来就形成光谱仪。类似单色仪，光谱仪也分为棱镜光谱仪和光栅光谱仪。早期利用化学方法记录（摄谱仪）。后来采用光电倍增管，现在采用 CCD 或者 CMOS 传感器。

现在，我们用光学多通道分析器来拍摄原子发射光谱。光学多通道分析器（OMA）由光栅单色仪、CCD 或 CMOS 接收单元、扫描系统、电子放大器、A/D 采集单元、计算机组成。该设备集光学、精密机械、电子学、计算机技术于一体。常用的光谱仪的光学系统采用 C-T 型，如图 3 所示。入射狭缝、出射狭缝均为直狭缝，宽度范围 $0-2\text{mm}$ 连续可调，顺时针旋转为狭缝宽度加大，反之减小，每旋转一周狭缝宽度变化 0.5mm 。狭缝的宽度由螺旋移动刀片来改变，这些刀刃经过精磨，十分锐利，因而也极易损坏，调节时要特别小心。为延长使用寿命，调节时注意最大不超过 2mm ，平日不使用时，狭缝最好开到 $0.1-0.5\text{mm}$ 左右。狭缝的质量直接决定了谱线的质量。

光源发出的光束进入入射狭缝 S1，S1 位于反射式准光镜 M2 的焦面上，通过 S1 射入

的光束经 M2 反射平行光束投向平面光栅 G 上,衍射后的平行光束经物镜 M3 成像在 S2 上。

M2、M3 焦距 302.5mm; 光栅 G 每毫米刻线 600 条, 闪耀波长 550nm。

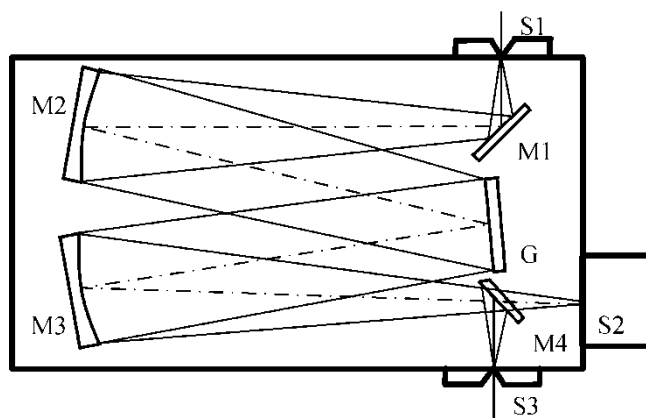


图 3 光学多通道分析仪原理示意图

其中, M1—反射镜、M2—准光镜、M3—物镜、M4—转镜、G—平面衍射光栅、S1—入射狭缝、S2—CCD 接受位置、S3—观察窗 (或出射狭缝)

具体可参考《基础物理实验 (沈韩主编)》中第 11 章 321 页。

在本实验中做了简化处理, 使用集成性更高操作更简便的光纤光谱仪 (如 AvaSpec-ULS2048CL-EVO), 相较于上文所介绍的光谱仪, 去除了入射狭缝和出射狭缝。光谱仪入射端口为光纤接口, 直接在 CMOS 上成像, 由光谱仪软件测量光谱。该光谱仪测量波长范围 200-1100nm, 测量精度 0.06-20nm。

【实验装置】

使用光纤光谱仪观测和分析光谱的仪器, 参考光纤光谱仪仪器说明书。

【注意事项】

光纤不能过度弯折; 信号强度不能过饱和值。

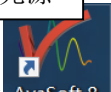
【实验内容和步骤】

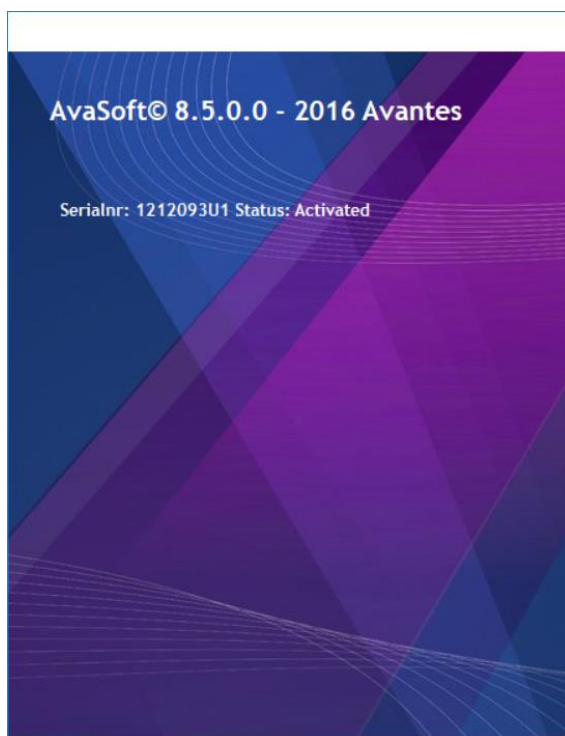
1. 正确链接光谱仪和光源。





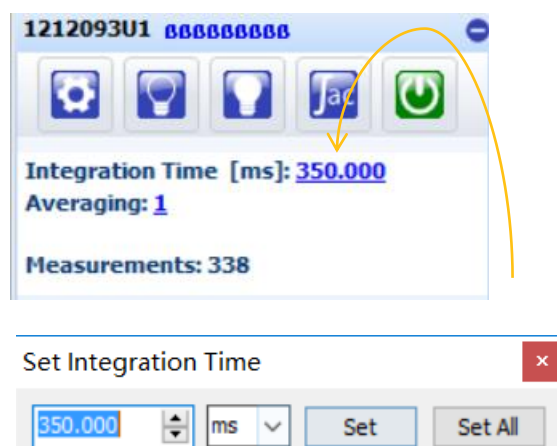
光源

光谱仪

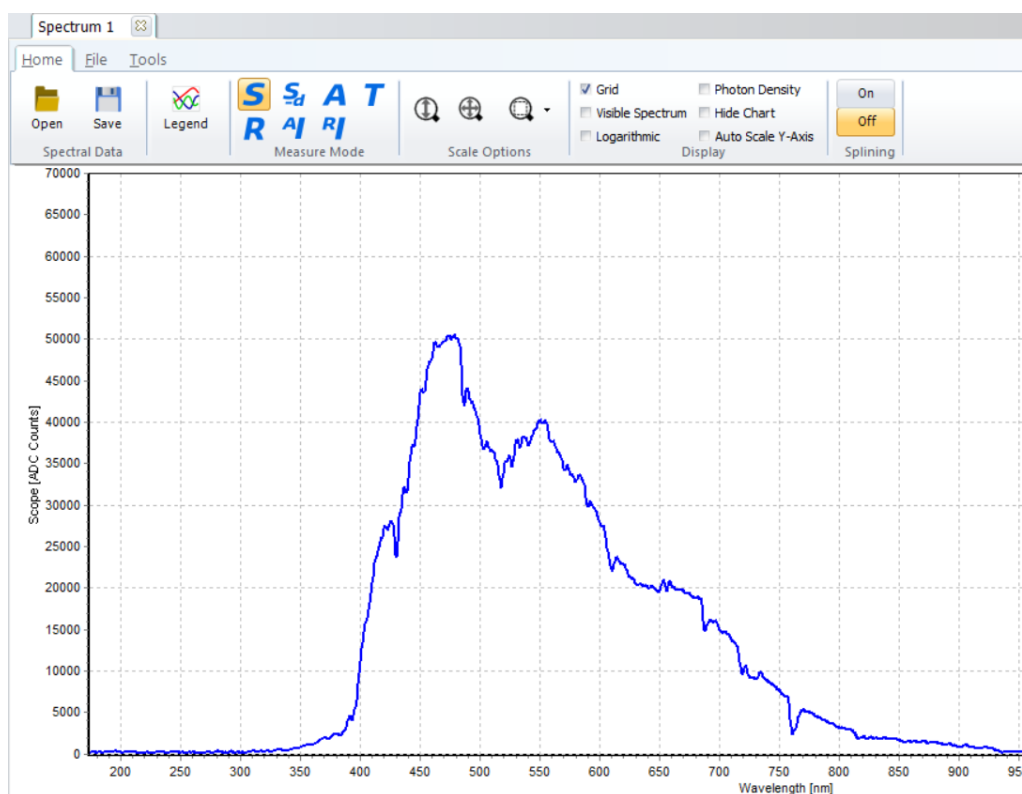
- 1 双击  图标打开软件。如果正确链接光谱仪会显示出正在使用光谱仪的序列号，如下图所示。



- 2 打开光源，点击  按钮，然后可以点击  按钮自动设置积分时间然后手动微调或直接通过点击积分时间后面的数字手动设置积分时间和平均次数。



一般情况下，信号强度应调整为饱和值的 80% 左右。如下图所示。



- 3 重复上述方法分别拍摄钠原子光谱，汞原子光谱，氖灯光谱和卤素灯光谱。找到特征谱线，观测光谱分布特点，保存光谱图片和实验数据。
- 4 观测阳光，电灯，手机屏等的光谱特点。

【思考题】

- 1 钠原子光谱有哪些特征？