

用多功能光栅光谱仪测定光谱灯的光谱特性（汞灯）

物质的发光是存在于自然界最普遍最基本的现象之一,它和物质的微观结构有着必然的联系,所以对它的研究是人们了解和认识微观世界的重要手段和方法。光谱是指辐射源所发出的电磁波强度随波长变化的分布曲线。它反映了特定辐射源的发光特性,其中分立的线状单色光谱称为线状光谱或谱线,小波段范围内连续的光谱称为谱带,而大范围内连续的光谱称为连续光谱。一般说来,固体发射的热辐射是连续光谱,而被激发的原子和分子所发出的辐射是各种分立的光谱。这些分立的光谱标志着原子和分子的结构与特性,成为原子和分子的标识。因此,光谱不仅可以作为研究原子和分子结构的手段和依据,也可以用来鉴定物质的化学性质和成份。迄今为止,我们所掌握的原子和分子方面的绝大部分知识来自于光谱研究。同时,光谱分析已成为科学技术中应用最广泛的物质成份分析与鉴定技术。通过本实验了解物质发光的光谱特性与物质结构的关系,了解光栅光谱仪和光电倍增管的结构、工作原理及使用,掌握用光栅光谱仪测定光源辐射能谱的方法,了解计算机在实验技术中的应用。

【实验目的】

1. 了解物质发光的光谱特性与物质结构的关系。
2. 了解光栅光谱仪和光电倍增管的结构、工作原理及使用。
3. 掌握用光栅光谱仪确定光谱灯的光谱特性的方法。
4. 了解计算机在实验技术中的应用。

【实验仪器】

WGD-8A 型组合式多功能光栅光谱仪
白炽灯
GP20Hg 低压汞灯,计算机

【实验原理】

汞灯是利用汞蒸气弧光放电而发光的。发光的基本过程分为 3 步:电子的发射和被阴极和阳极间的电场加速;高速运动的电子与汞蒸气原子碰撞时,电子的动能就转移给汞原子使其激发;当受激原子返回基态时,所吸收的能量以辐射(发光)形式释放出来。电子的不断产生和被电场加速,就使过程不断地进行下去。

1、光源的辐射能谱及其测量

光源在单位时间辐射出的辐射能称为光源的辐射通量,单位为 W。光源辐射通量随波长的分布称为光源的辐射能谱,即单位波长对应的辐射通量,也叫光谱能量分布,用 $E(\lambda)$ 表示,单位为 W/m。它反映了光源的辐射特性。

用光栅光谱仪便可实现对光源辐射能谱的测量。测量时,探测器直接测得的是单色仪输出的不同波长的光对应的光电压 $U(\lambda)$ 。 $U(\lambda)$ 满足下式

$$U(\lambda) = KE(\lambda)T(\lambda)S(\lambda)\Delta\lambda$$

$$U(\lambda) = KE(\lambda)T(\lambda)S(\lambda)\Delta\lambda$$

其中： $E(\lambda)$ 为光源的辐射能谱； $T(\lambda)$ 为单色仪的相对光谱透射率，它是由于单色仪中光栅等光学元件对不同波长的光的透射率不同以及光学元件造成的色散等引起的； $S(\lambda)$ 为探测器的光谱灵敏度，它表示单位辐射通量在探测器上产生的光电压或光电流的大小； K 是与光谱仪及其状态相关的比例系数； $D\lambda$ 为出射光谱宽度。由于光栅对不同波长的光色散率不同，相同的出射缝宽所包含的不同波长光的光谱宽度不同，引起出射光谱能量分布与原光源的光谱能量分布也不同。如若 Ds 为出射狭缝宽度，则在 λ 处

$$\Delta \lambda = \left. \frac{d\lambda}{ds} \right|_{\lambda} \Delta S$$

这样可得

$$E(\lambda) = \frac{U(\lambda)}{KT(\lambda)S(\lambda) \left. \frac{d\lambda}{ds} \right|_{\lambda} \Delta S}$$

$$E(\lambda) = \frac{U(\lambda)}{KT(\lambda)S(\lambda) \left. \frac{d\lambda}{ds} \right|_{\lambda} \Delta S}$$

可以看出，要得到光源的辐射能谱 $E(\lambda)$ ，就必须知道单色仪的相对光谱透射率 $T(\lambda)$ ；探测器的光谱灵敏度 $S(\lambda)$ ；色散率曲线 $d\lambda/ds \sim \lambda$ 和比例系数 K ，但单独测定 $T(\lambda)$ 、 $S(\lambda)$ 及 $d\lambda/ds \sim \lambda$ 曲线较为麻烦。如果用一已知辐射能谱为 $E_s(\lambda)$ 的光源，在相同的实验条件下测出其光电压 $U_s(\lambda)$ ，则有

$$E_s(\lambda) = \frac{U_s(\lambda)}{KT(\lambda)S(\lambda) \left. \frac{d\lambda}{ds} \right|_{\lambda} \Delta S}$$

比较上两式，容易得出

$$E(\lambda) = \frac{E_s(\lambda)}{U_s(\lambda)} \cdot U(\lambda) \quad (1)$$

$$E(\lambda) = \frac{E_s(\lambda)}{U_s(\lambda)} U(\lambda) \quad (1)$$

这种用已知光源的光谱能量分布来确定光谱仪的测量系数 $KT(l)S(l)DI$ 的过程叫定标。从上式中不难看出，仪器经过定标后测量便比较容易了。

理想的标准光源是绝对黑体，因为绝对黑体的辐射能谱 $E_b(l, T)$ 服从普朗克公式

$$E_b(\lambda, T) = \frac{cS}{4} \frac{8\pi hc \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda KT}} - 1}$$

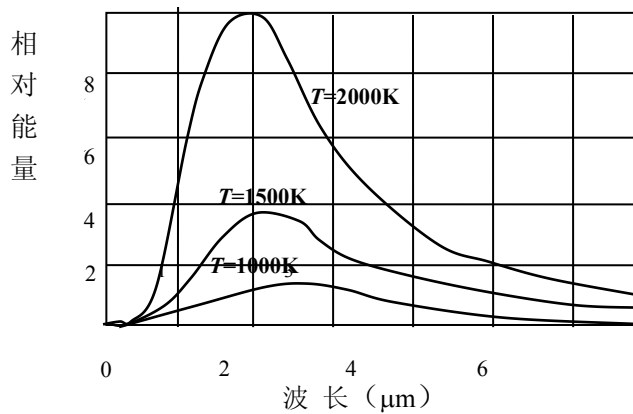


图1 绝对黑体相对辐射能谱

式中， h 为普朗克常数 (Planck constant)； c 为光速； k 为玻尔兹曼常数 (Boltzmann constant)； T 为黑体的绝对温度； l 为辐射光波长； S 为黑体光源的发光面积。不难看出，对于给定的黑体光源，其辐射能谱 $E_b(l, T)$ 只取决于温度 T 。图1 给出了不同温度时绝对黑体的相对辐射能谱。

由于黑体光源不易获得，在要求不高的情况下，常用白炽钨灯作为次级标准光源，因为其相对辐射能谱与绝对黑体非常接近，尤其是在可见光波段符合的很好。用白炽钨灯作为标准光源，在可见光区，且分布温度 $T_d=2444\text{K}$ 时公式可简化为

$$E_S(\lambda, T_d) = \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda KT_d}} - 1} \cong \lambda^{-5} e^{-\frac{hc}{\lambda KT_d}} = \lambda^{-5} e^{-\frac{5885}{\lambda(\text{nm})}} \quad (2)$$

实验中，通过计算机可直接获得待测光源在光栅光谱仪光电倍增管上输出的光电压 $U(I)$ 的相对值，使用一分布温度 T_d 已知的普通白炽灯作为标准光源，在相同的条件下测出其光电压 $U_S(I)$ ，再由公式 (2) 算出其相对辐射能谱 $E_S(I)$ 。将上述各量代入 (1) 式，即可算出待测光源的相对辐射能谱 $E(I)$ 。

2、WGD-8A 型组合式多功能光栅光谱仪

WGD-8A 型组合式多功能光栅光谱仪，由光栅单色仪，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。光学系统采用的是切尔尼-特纳装置 (C-T) 型，如图 1-1 所示。

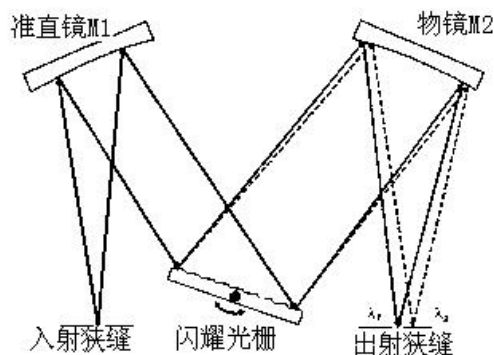


图 1-1 切尔尼-特纳光路图

准直和成像的焦距是 500nm ，相对孔径 $1/7$ ，光栅条数分别为 $24001/\text{mm}$ 和 $12001/\text{mm}$ ，闪耀波长为 250nm 。波长扫描机构是图 1-2 所示的正弦机构。

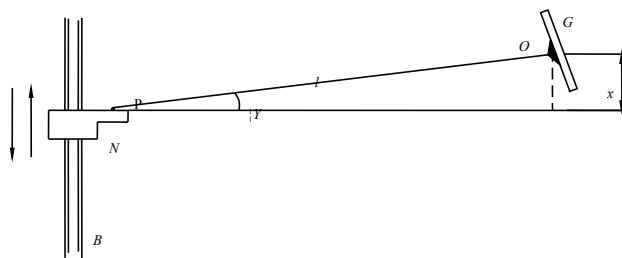


图 1-2 正弦机构原理

由计算机对光谱仪进行扫描控制、信号处理和光谱显示。其工作原理如图 1-3 所示。

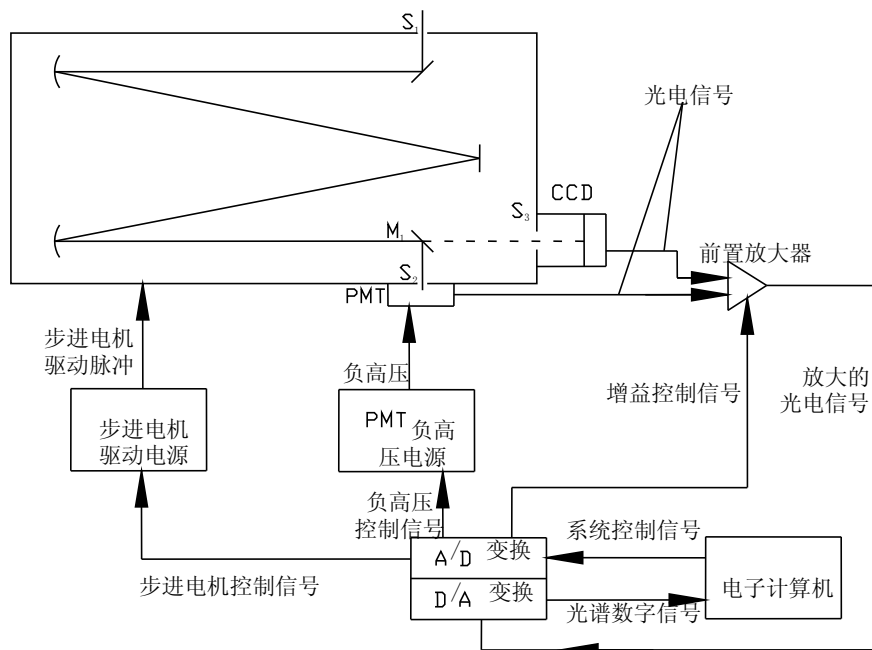


图 1-3 光谱仪的工作原理

光谱仪的探测器为光电倍增管或 CCD，用光电倍增管时，出射光通过狭缝 S2 到达光电倍增管。用 CCD 做探测器时，转动小平面反射镜 M1，使出射光通过狭缝 S3 到达 CCD，CCD 可以同时探测某一个光谱范围内的光谱信号。

光信号经过倍增管（或 CCD）变为电信号后，首先经过前置放大器放大，再经过 A/D 变换，将模拟量转变成数字量，最终由计算机处理显示。前置放大器的增益、光电倍增管的负高压和 CCD 的积分时间可以由控制软件根据需要设置。前置放大器的增益现为 1, 2, ..., 7 七个档次，数越大放大器的增益越高。光电倍增管的负高压也分为 1, 2, ..., 7 七个档次，数越大所加的负高压越高，每档之间负高压相差约 200V。CCD 的积分时间可以在 10ms-40s 之间任意改变。

扫描控制是利用步进电机控制正弦机构（根据光栅方程，波长和光栅的转角成正弦关系，因此采用正弦机构。）中丝杠的转动，进而使光栅转动实现的。步进电机在输入一组电脉冲后，就可以转动一个角度，相应地丝杠上螺母就移动一个固定的距离。每输入一组脉冲，光栅的转动便使出射狭缝出射的光波长改变 0.1nm。

为去除光栅光谱仪中的高级次光谱，本仪器备有滤光片：

- 白片 320—500nm
- 黄片 500—660nm

图 2 为汞灯参考光谱

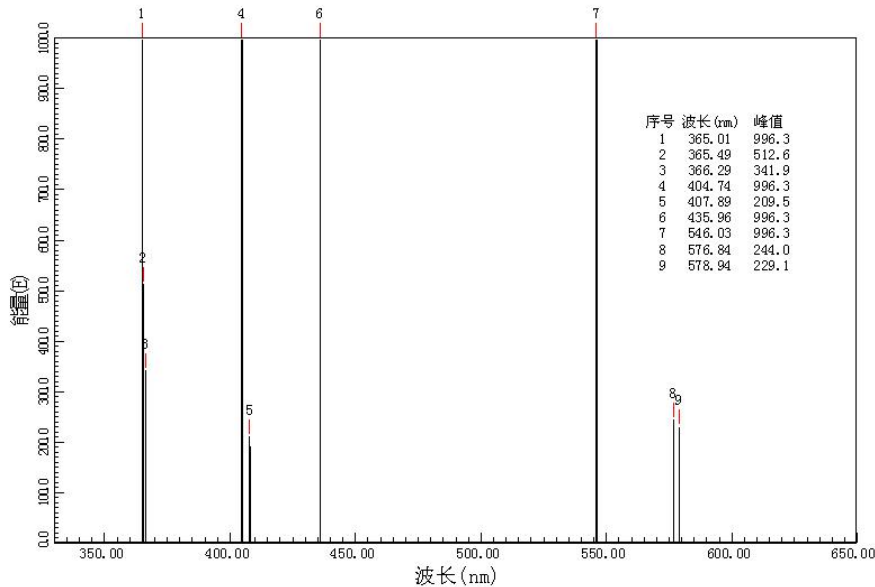


图 2 汞灯光谱

【实验步骤】

1. 用汞灯谱线对光栅光谱仪进行校准:

利用汞灯的五根谱线的波长值（标准值为 404.7nm、435.8nm、546.1nm、577.0nm、579.0nm）来进行校准仪器。根据能量信号大小手工调节入射狭缝和出射狭缝，扫描汞灯光谱。如果波长有偏差，用“波长线性校正”功能进行校正。

2. 测量低压汞灯的相对辐射光电压分布 $U(\lambda)$

(1) 打开汞灯电源，将仪器放置于适当位置。

(2) 打开电控系统电源，进入操作界面。

(3) 选定“参数设置”菜单，合理设置参数。

(4) 选择“工作方式”菜单，单击“单程扫描”

(5) 扫描完成后读取数据，选定“检峰”选项，记录下各峰的波长和相应的相对光电压值

(6) 关掉汞灯电源并将其移开

3. 测量白炽灯的相对辐射光电压分布 $U_s(\lambda)$

(1) 打开白炽灯电源，将其灯丝对准光谱仪的入射狭缝 S1 处，旋转调光旋钮使灯至最亮。

(2) 选定“参数设置”菜单，进行参数设置。

(3) 按前述 (4) ~ (5) 步骤，在屏幕上获得白炽灯的辐射光电压分布曲线。

(4) 移动游标“×”，读取数据并列表记录。

(5) 改变灯丝温度，使灯光稍暗，观察不同灯丝温度时白炽灯的辐射光电压分布曲线。

【注意事项】

1. 开机之前，请认真检查光栅光谱仪的各个部分（单色仪主机、电控箱、接受单元、

计算机、) 连线是否正确, 保证准确无误。

为了保证仪器的性能指标和寿命, 在每次使用完毕, 将入射狭缝宽度、出射狭缝宽度分别调节到 0.1mm 左右。

在仪器系统复位完毕后, 根据测试和实验的要求分别调节入射狭缝宽度、出射狭缝宽度到合适的宽度。

2. 接收单元

多功能光栅光谱仪配有光电倍增管、CCD 接收单元。

注意, 若采用光电倍增管作为接收单元, 不一定要在光电倍增管加有负高压的情况下, 使其暴露在强光下 (包括自然光)。在使用结束后, 一定要注意调节负高压旋钮使负高压归零, 然后再关闭电控箱。

3. 光谱仪的电压不能超过 1000 伏。

4. 狭缝调节

仪器的入射狭缝和出射狭缝均为直狭缝, 宽度范围 0~2mm 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, 最大调节宽度为 2mm。为延长使用寿命, 狭缝宽度调节时应注意最大不要超过 2mm。仪器测量完毕或平常不使用时, 狭缝最好调节到 0.1mm~0.5mm 左右。

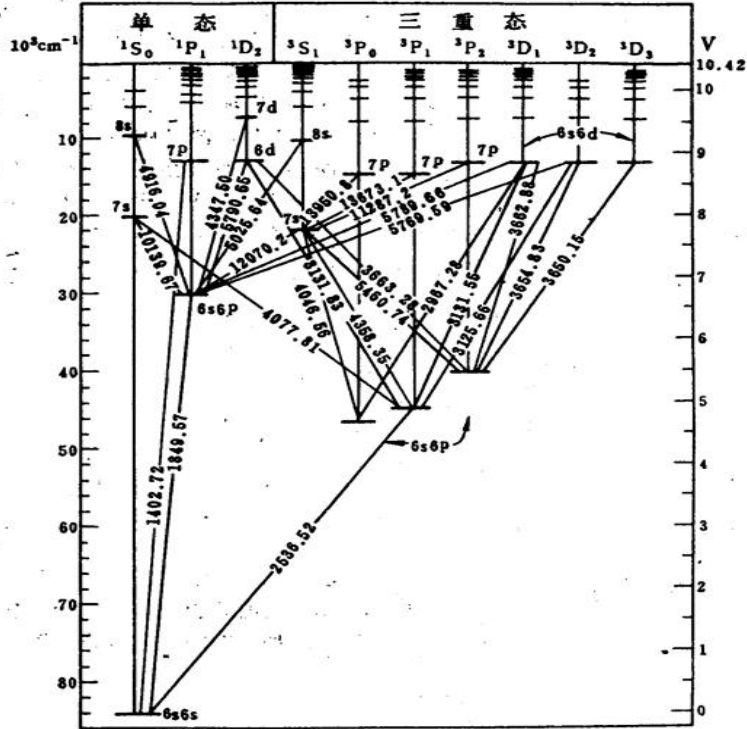
【思考题】

- (1) 在汞灯的一级衍射光谱中, 为什么紫光离中央谱线最近, 黄 2 光离中央谱线最远?
- (2) 如果用白光作光源, 中央谱线应是什么颜色? 两侧应是什么样的光谱?
- (3) 用光栅测波长时, 为什么要把光栅面放置在两只平台台面调节螺丝的中垂线上?

【参考资料】

1. 吴国安 光谱仪器设计 科学出版社 1978.
2. 祝绍箕, 邹海兴, 包学诚, 等 衍射光栅 机械工业出版社 1986.

汞原子能级图



| | | | |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1042.72 A° | 1849.57 A° | 2536.52 A° | 2967.28 A° |
| 3125.66 A° | 3131.56 A° | 3131.83 A° | 3650.15 A° |
| 3654.83 A° | 3662.88 A° | 3663.28 A° | 4046.56 A° |
| 4077.81 A° | 4347.50 A° | 4358.35 A° | 4916.04 A° |
| 5025.64 A° | 5460.74 A° | 5769.59 A° | 5789.66 A° |
| 5790.65 A° | 8131.83 A° | 10139.67 A° | 10270.2 A° |
| 11287.2 A° | 13673.1 A° | 13950.8 A° | 16942.0 A° |
| 18130.38 A° | 19700.17 A° | | |

图 汞原子能级图

参考数据

GP20Hg 低压汞灯相对辐射能谱的测量数据表 ($T_d=2444\text{K}$)

| | | | | | |
|--------------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| $\lambda(\text{nm})$ | 404.0 | 407.2 | 435.2 | 546.6 | 576.5 |
| $U(\lambda)$ | 500.6 | 45.4 | 966.5 | 349.9 | 32.0 |
| $US(\lambda)$ | 192.6 | 199.5 | 329.8 | 543.5 | 515.8 |
| $ES(\lambda) \times 10^{-20}$ | 4.383 | 4.724 | 8.586 | 42.726 | 57.897 |
| $E(\lambda) (\times 10^{-20})$ | 11.393 | 1.075 | 25.162 | 27.538 | 3.591 |
| | 0.413 | 0.039 | 0.914 | 1.000 | 0.130 |