

光学专门实验讲义

光学教研组编

中山大学

一九八三年九月·广州

目 录

实验一：钠原子光谱分析

实验二：光谱定量分析

实验三：谱线宽度的测量

实验四：测定硅光电池光谱响应

实验五：白炽光源光谱能量分布的测定

实验六：全息照相与全息干涉计量术

实验七：氦氖激光器参数测试

实验八：光学倍频实验

实验九：受激喇曼散射实验

实验十：斑纹照相

实验十一：加色法、减色法及彩色合成

实验十二：光学信息处理

实验一 钠原子光谱

原子、分子光谱是研究了解原子和分子内部结构的重要实验手段，本实验通过拍摄、测量钠原子的谱线系，求出量子数并绘制出它的能级图验证理论的正确性。

一、原理

(1) 钠原子光谱：

碱金属 (Li , Na , K ...) 的原子光谱是和该碱金属原子的价电子轨道跃迁有关。原子核和内电子所形成的满壳层构成了一个原子实，原子实基本上是球形对称，带电量为 $Z_0 = (Z-1)e = -e$ ， Z 为原子序数。价电子在单位 Z 电荷的库仑场中运动，因此碱金属的价电子能量和光谱规律与氢原子是相似的，这里回忆一下氢原子中电子能量为

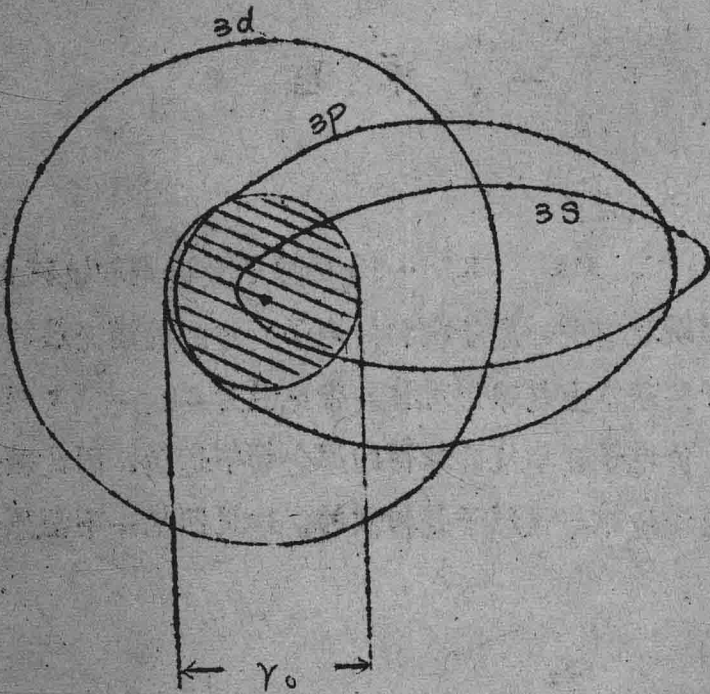
$$E_n = -hcR \frac{Z^2}{n^2}$$

这里 $Z=1$ ， R 为黎德堡常数， h 为普朗克常数， c 为光速。

但在碱金属的原子中，由于原子实和原子核有很大区别，价电子和原子核的相互作用也就较复杂，因而有比氢原子多的能级，这些能级的增加是由于原子实的极化和轨道贯穿所引起的，在氢原子的理论处理基础上引入一个辅量子数，即轨道量子数 l ，碱金属原子中的

价电子的能量不但和主量子数 n 有关，而且和轨道量子数 l 有密切关系。如下图：

l 不同，椭圆轨道形状不同。 l 较小时，如 $l=0$ 椭圆较扁，有一部分轨道穿入原子实的内部而形成轨道贯穿，由于轨道贯穿引起原子实极化，因而价电子能级下降很多，对 l 较大时，如 $l=3$ ，价电子轨道基本上是圆形，接近于氢原子能级。



引入辅量子数 l 后，碱金属原子价电子能量和氢原子价电子能量一样，写成：

$$E_n = -hcR \cdot \frac{1}{(n - \mu_e)^2} = \frac{-hcR}{n^*{}^2}$$

n^* 为有效量子数，较主量子数 n 小， μ_e 称为量子缺。对于不同的主量子数， μ_e 又应有不同的一系数值。因 n 越大，原子核的极化情况愈少。对于同一个 n ， μ_e 随辅量子数 l 而不同。用 S 表示 $l=0$ ；用 P 表示 $l=1$ ，用 d 表示 $l=2$ ，用 f 表示 $l=3$ 。 l 的选择定则为 $\Delta l = \pm 1$ 。

当 n' 为下能级主量子数， $\mu_{e'}$ 为下能级的量子缺。

n 为上能级主量子数， μ_e 为上能级量子缺。此时，由于上能级跃迁到下能级，谱线的波数应等于上下能级之差，即有：

$$\bar{\nu} = (E_n - E_{n'}) / ch = \frac{R}{(n - \mu_e)^2} - \frac{R}{(n' - \mu_{e'})^2}$$

对钠原子为例：原子序数 $Z=11$ ， $n=1$ 占据 2 个电子， $n=2$ 占据 8 个电子。这 10 个内电子占据了 2 个轨道，因而价电子最低主量子数为 $n=3$ ，而辅量子数分别有 4 个，即 $l=0, 1, 2, 3$ 。所对应代号为 S, P, d, f ，因而价电子的最低能级有 4 个，即 $3S, 3P, 3d, 3f$ ，其中又以 $3S$ 能级为最低， $3f$ 为最高。

* 由于上下能级之间的跃迁受选择定则的限制 ($\Delta l = \pm 1$) 令 n' ， l' 固定为 4 个最低基态能级，而令 n 依次改变，共有 4 个线系。

主线系 (P 线系) $3S - nP$ $n=3, 4, 5, \dots$

漫线系 (d 线系) $3P - nd$ $n=3, 4, 5, \dots$

锐线系 (S 线系) $3P - ns$ $n=4, 5, 6, \dots$

基线系 (f 线系) $3d - nf$ $n=4, 5, 6, \dots$

在各线系中， $3S, 3P, 3d$ 所对应的 n' ， l' 为一定。

对应的项 $\frac{R}{(n' - \mu' e')^2}$ 称为固定项，而 $\frac{R}{(n - \mu e)^2}$ 为变动项，随

n 而变 $n = n', n' + 1, n' + 2, \dots$ 。

要作出钠原子的能级图就必须先求出固定项；即求出基态的4种能级来。

(2) 钠原子光谱的获得：

因为通常原子总是处在基态，即稳定态，价电子总是处在最低能量的轨道上，要得到原子光谱，必需要将这些价电子分别激发到各个较高的能级上，其跃迁到基态能级时才会放出光子，我们才有可能得到一系列的这种原子的光谱。激发愈高的能级，所需的能量愈大最后至电离。通常采用电弧发生器或火花发生器。

发生器的基本原理是利用高压加于待测两金属电极之间。本实验用碳棒作电极。（碳电极的下电极开一小孔放入待测光谱的样品）当高压及高频打火导通两电极间的气体（样品此时已蒸发成原子并受激或电离）这过程大量的原子从基态激发至各种可能存在的高能态中又迅速回至基态而放出不同波长的光，如将这时电极发出的弧光聚焦于摄谱仪的狭缝，经过色散便可得到各光谱系。本实验是用交流电弧发生器。

二、实验要求：

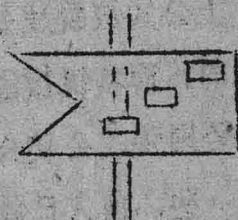
1、对原子光谱研究的基本实验手段的基本了解，如交流电弧发生器的使用，摄谱仪选择与调整，底片的性能与要求，波长的测量等。

2、通过实验加深对原子光谱、能级、主量子数、辅量子数的系数的认识。

三、实验步骤：

1、用交流电弧发生器。纯碳棒电极钻一小孔作下电极，上电极削尖，交流电弧的电源电压为220伏，电流为5 A。电极的中心点必须落在摄谱仪的光轴上。

2、钠原子的基线系完全落在红外区，基于实验条件限制，不拍。其余线系可用QS-20型水晶摄谱仪进行拍摄。由于钠原子是放在碳电极中激发，所以必须另拍一个纯碳光谱以扣除钠光谱中的本底，和为测量波长，必须拍一个铁光谱。在拍摄这三个光谱时，为避免底片盒的移动带来的实验误差，应采用合特曼光栏，即在狭缝前面每次取不同高度以代替底片位移。实验条件详见实验板。

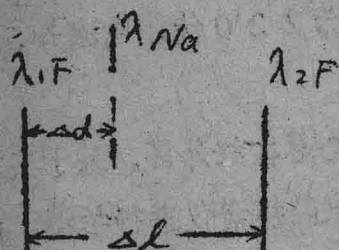


(合特曼光栏)

3、获得良好的钠光谱后，先用投影仪放大，因这样能看到较大的视场，辨识各个谱线，主线系较强，双线波数差随波长减小而减小。锐线系谱线清晰，漫线系谱线比较粗而模糊，两种波数差却不变。每个线系谱线之间的距离和强度均随波长减小而减小（想想为什么有此客观规律？）这可作辨识的参考。

4. 比长计测波长.

在两条已知波长 $\lambda_1 F$ 和 $\lambda_2 F$ 之间有一钠谱线. 必须量出钠线至较近的那条铁线之距离 Δd . 用内插法有:



$$\lambda_{Na} = \lambda_1 + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\Delta l} \Delta d \quad (\lambda_2 > \lambda_1)$$

如读出另一段距离, 上公式应换成另一形式希自己推导出. 由于上公式仅用于色散为线性的, 而棱镜摄谱仪的色散并非线性, 故必须找接近 Na 线的铁谱线, 否则误差会较大.

5. 为求量子数方便一些, 前人已做了大量实验, 总结出一个黎德堡表以求主量子数和量子数. 方法是将波数公式写成同一线系每相邻二线波数差公式:

$$\nu = \frac{R}{(n - \mu_e)^2} - \frac{R}{(n + 1 - \mu_e)^2} = \frac{R}{(m + \Delta_e)^2} - \frac{R}{(m + 1 + \Delta_e)^2}$$

只要求出同一线系两相邻两线的波数差，使可以从黎德堡表中查出 m 及 $\Delta\sigma$ ，从而按照：

$$n - \mu e = m + \Delta\sigma \quad m \text{ 为整数, } \Delta\sigma \text{ 为正小数.}$$

可求出 n 及 μe 即可以求出固定项，从而画出钠原子的能级图。要求以电子伏特或波数作能级图。计算出钠原子的共振电势和电离电势。

6、具体拍摄条件参看面板。

实验二 光谱定量分析

——用三标样方法分析钢中含钨(W)量

一、定量分析的基本原理：

光谱定量分析在工业生产和科学研究中应用很广，它的优点是迅速而准确，尤其是当含量低微时，光谱定量分析具有独到之处。

基本原理也比较简单，它是根据元素的含量 C 与其谱线强度 I 之间有下列的关系：

$$I = a C^b \quad (\text{罗马金实验公式}) \cdots \cdots (1)$$

式中 a 、 b 为二个常数。若将 (1) 式取对数 (10 为底) 即为：

$$\lg I = b \lg C + \lg a \quad \cdots \cdots (2)$$

一般光谱定量分析都采用相对强度。设分析线的强度为 I_1 ，内标线的强度为 I_2 ，则相对强度： $R = \frac{I_1}{I_2}$ ，则 (2) 式可变为：

$$\lg R = \lg \frac{I_1}{I_2} = b \lg C + \lg a \quad \cdots \cdots (3)$$

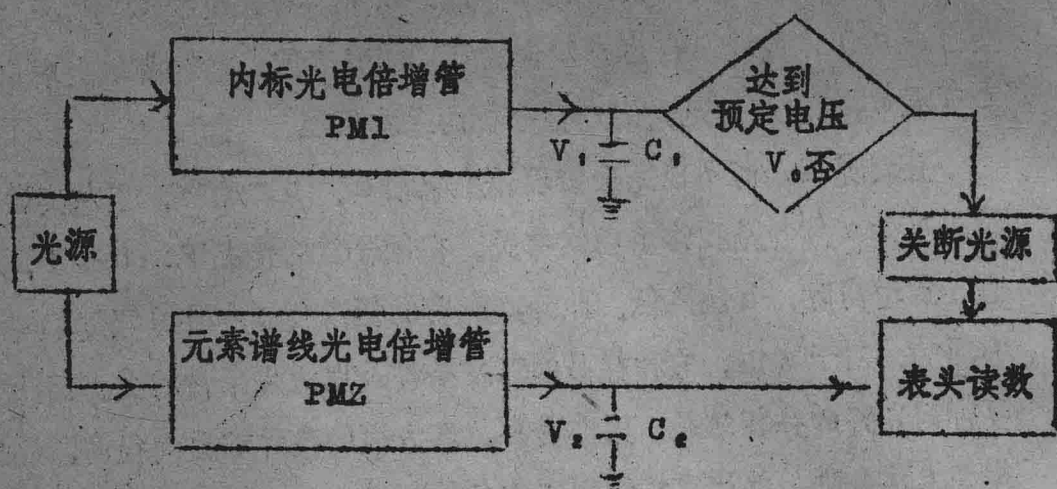
由此可见, I_g (或 I_g^R) 与 I_g^C 成线性关系。若用已知含量的标准试样进行实验, 就可以作出以 I_g^R 为纵坐标, I_g^C 为横坐标的工作曲线。再由未知含量 C_x 的强度值, 在这曲线上求出未知含量 C_x 。这就是光谱定量分析的基本原理。

直到现在, 尚不能完全由理论上求出 a 、 b 二常数。但从实验的结果可知 a 、 b 是和许多因素有关。在低含量的情况下, $b \simeq 1$, 而当含量增高时, b 值降低。此外, 所有的摄谱仪器和狭缝宽度都对 b 有影响。对于 a 值, 它和样品的蒸发条件及电激发条件有关。因此, 要得到良好的分析结果, 则非易事。各方面的条件都要求很高, 要选择好工作条件, 并严格做到工作条件相同和稳定, 以便达到分析的准确度。

二、实验部分:

本实验采用 WKD-1 型光电析钢仪进行定量分析。它具有光电光谱仪器速度快的优点。而且只要选择和控制好工作条件, 分析的准确度是高的。

本仪器采用“白光”作为内标, 所谓“白光”即未经色散的光线。以元素相应的分析谱线作为强度测量, 从而获得元素的含量。由于电弧强度的波动或样品斑点的漂移等放电不稳定, 该仪器采用积分方法。其方法是把未色散的光取一部分作为参比信号(内标), 同时与谱线信号在电容器 C_1 或 C_2 上积分(见图一)。当电容器 C_1 上的电压达到某一数值 V_1 时, 继电器便切断电弧发生器电源, 并读出电容器 C_2 上的电压值 V_2 或电流值 I 。



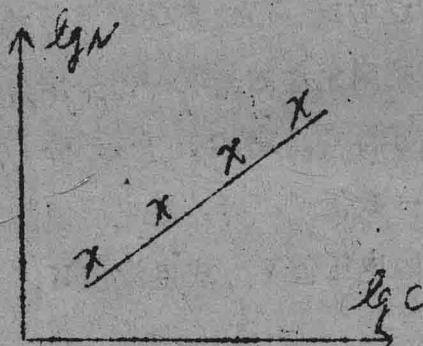
(图一)

经光——电转换后，元素的含量 C 的对数也相对地与电压或电流的对数成线性关系。因此作出 $\lg I$ 与 $\lg C$ 的工作曲线（如图二），求出含量 C 。为了快速也可用内插法来求元素的含量。

$$\text{即: } \frac{\lg I_2 - \lg I_1}{\lg C_2 - \lg C_1} = \frac{\lg I - \lg I_1}{\lg C - \lg C_1}$$

或近似地写成：

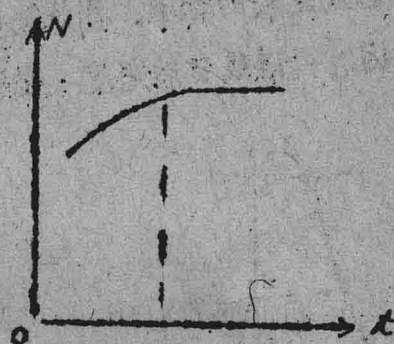
$$\frac{I_2 - I_1}{C_2 - C_1} = \frac{I - I_1}{C - C_1}$$



(图二)

含量 C 即可以从上公式中算出来。其中标钢 I 的含量为 C_1 ，表示读数为 $И_1$ ；标钢 II 的含量为 C_2 ，表头读数为 $И_2$ ；试样的含量为 C ，表头读数为 $И$ 。

在进行分析之前，先要选择好预燃时间，因为放电开始时，元素在弧焰中的蒸气浓度并未立即达到极值，要经过一段时间才能达到稳定下来。所以作定量分析，选择预燃时间是很重要的。方法是从预燃时间 $t=0$ 开始，逐次作出 t 增大时表头上的读数 $И$ 值。作出 $И-t$ 曲线，求出预燃时间 t 。（如图三）。



(图三)

同样，其他工作条件（如电极之间距离，电流大小，等等）都要选择好才能进行定量分析。

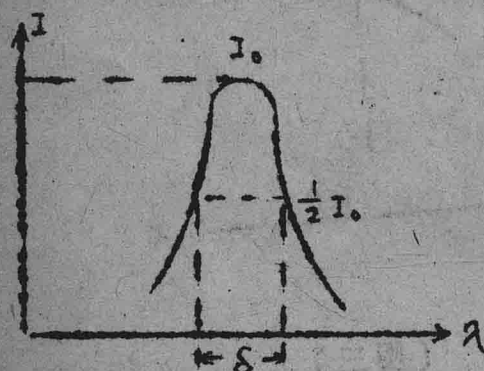
本实验要求：(1)作出标准钢样中钨的预燃曲线。(2)定出某钢中钨的含量。

实验三 谱线宽度的测量

一、引言

理想的单色辐射都包含一定的波长范围。所谓谱线，只不过是一个很狭的光谱区域辐射而已。在这区域辐射的能量分布，从中心到边缘迅速递减（如图一所示）。通常规定在谱线强度等于峰值一半处的宽度作为谱线宽度的标志及比较的标准。称此宽度为半宽度 δ 。

引起谱线宽度的原因有：谱线自然宽度，碰撞增宽，共振增宽，



(图一)

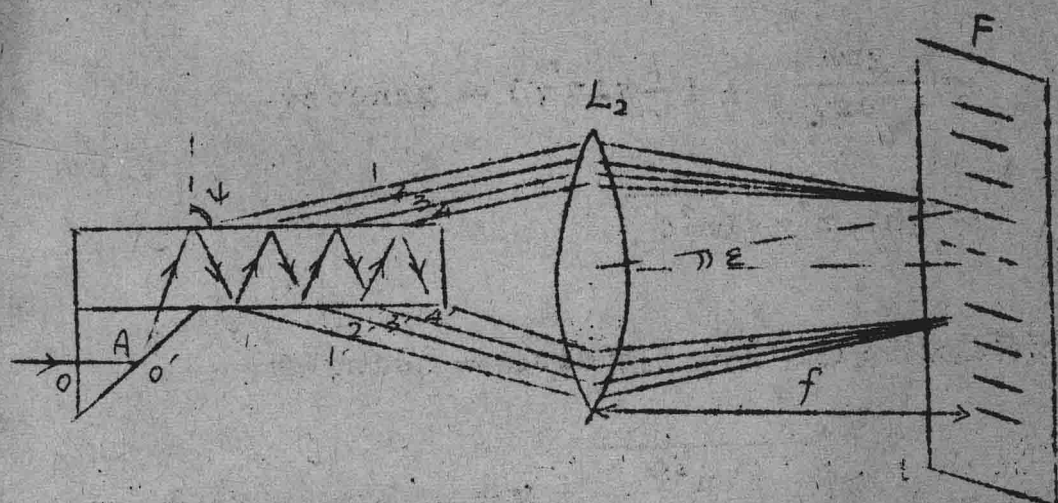
塞曼增宽，斯塔克增宽（详见原子光谱讲义），最后还有仪器增宽。

谱线宽度的研究，在理论及应用方面均有其重要意义。可以了解放电区中激发原子（或离子）与原子及电子的碰撞过程。在进行光谱定量分析，而当元素含量较高出现“自蚀”现象，用普通的光谱定量分析法无法解决时，就可利用谱线宽度法进行光谱定量分析。它比一般方法优越。

本实验是应用鲁未——盖格板干涉法来测定谱线宽度的。因此，我们先说明鲁未——盖格板的工作原理。

二、鲁未——盖格板的基本原理：

鲁未——盖格板是用一块很均匀的、准确度很高的平面平行玻璃（或水晶）制成的。一般板长10—20 cm，宽1—2 cm，厚几毫米，平面平行度达0.02—0.01 埃。为了防止光线投射在板上使反射时的半波损失，而在板的一端附加上一全反射稜镜A（如图二所示）。光束 OO' 射入小稜镜A后在板内产生多次反射，每次反射时有部分光从板内掠面射出（ $\angle^{\phi} = 90^{\circ}$ ， $\angle^{\xi}$ 很小），则在板的两侧形成一系列平行光束1, 2, 3, 4, ……和1', 2', 3', 4' ……，每组有十几条光束，它们是相干的。如果用会聚透镜 L ，将这两组光束聚焦，则在透镜的焦面 F 上，产生上下对称二组干涉条纹。因此鲁未——盖格板就是利用多光束干涉原理的一种高分辨仪器。在这里我们着重说明几个有关的物理量。



(图二)

板的厚度， γ 为内部反射角。故在透镜焦面上形成干涉极大值（亮条纹）的条件为：

$$2h \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi} = K\lambda \dots\dots\dots (1)$$

$K=1, 2, 3, 4, \dots$ 称为干涉光谱数序。 λ 为入射光波的波长。

由(1)式可见，光谱数序与板的厚度成比例，而且与出射角 ϕ 、折射率 n 和光波波长 λ 有关；但与板的长度无关。由于鲁米——盖格板有很高的数序（ $K > 20000$ ），而高数序会引起不同波长的严重重叠，因此只有足够纯的单色光才能观察到干涉条纹。

设 $d\phi$ 对应于光谱数序间隔 dk 的角距离。则对(1)式微分（ λ 不变）得：

$$-2h \frac{\sin \phi \cos \phi}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \phi}} d\phi = \lambda dk$$

$$\text{即： } d\phi = - \frac{\lambda \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi}}{h \sin 2\phi} dk$$

则相邻光谱数序（ $dk = 1$ ）的角距离为：

$$\Delta \phi = - \frac{\lambda \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi}}{h \sin 2\phi} \dots\dots\dots (2)$$