

X 光实验中对莫塞莱定律的验证

复旦大学光科系 尤捷

摘要：本实验通过测量四种晶体的衍射谱，得出不同波长x射线的透射率，验证莫塞莱定律并求出里德堡常数和k壳层的屏蔽系数。

关键词：x 光 莫塞莱定律

1. 引言：

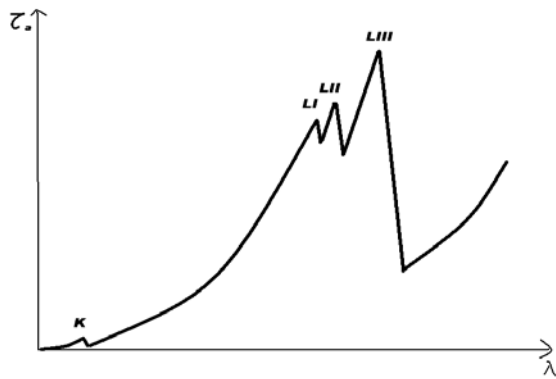
1895 年德国科学家伦琴(W. K. Roentgen)发现 X 光，是人类揭开研究微观世界序幕的“三大发现”之一，X 光管的制成，则被誉为人工光源史上的第二次大革命。X 光也叫 X 射线，它在医学、工业、材料科学、天文学、生物学等方面的应用十分广泛。

2. 理论基础：

A) x 光：波长在 10^{-8} m 到 10^{-11} m 范围的电磁波称为 x 光。当高速运动的电子和原子相碰撞时，一般都能发射 x 光。如果高速电子与原子中的内层电子相互作用，使其跃迁到外层（称为激发）甚至脱离原子的束缚（称为电离），从而在原子的内层形成空位。这时，外层电子就会向内层跃迁，以填补空位，并发出波长较短的光子，通常称为 x 光。

B) 莫塞莱定律 $\sqrt{1/\lambda_k} = \sqrt{R}(Z - \sigma_k)$ ：

内层电子的电离是物质对 x 光吸收的主要原因。X 光若要电离某壳层（如 k 层）的电子，则其能量 E 必须大于该壳层电子的结合能 E_k ，即： $E > E_k$ ，用相应的波长 $\lambda = hc/E$ 来描述则有： $\lambda < \lambda_k$ 。当波长小于 λ_k 而越接近于时，越容易激发电离，因而吸收系数越大；但一旦波长大于 λ_k ，吸收系数就会突然下降。因此，吸收系数在 λ_k 两侧有一个突变，可以预计吸收系数随波长的变化应如下图：



1913 年英国物理学家 Henry Moseley 在测量了各种元素的 k 壳层吸收边后，总结出了

Moseley 定律： $\sqrt{1/\lambda_k} = \sqrt{R(Z - \sigma_k)}$ 。其中，R 为里德堡常数，Z 为原子序数， σ_k 为 k 壳层的屏蔽系数。

3. 实验仪器：

德国莱宝公司的 X 射线实验仪及其附件。



实验装置分为三个区：左边是监控区，中间是 x 光管，右边是实验区。

实验软件：X-Ray Apparatus

4. 实验过程及结果：

1) 调校测角器的零点：

测角器归零后，在靶台上装 NaCl 晶体，在 COUPLED 模式下把靶台转到 7.2° 附近，在高压下分别用 SENSOR 和 TARGET 模式，手动调节靶台和传感器的位置，寻找计数率最大的传感器和靶台位置。寻找到 SENSOR 为 14.4°，TARGET 为 6.9° 时，计数率最大。再用 COUPLED 模式将靶台反向旋转 7.2°，将此位置设置为真正的零点位置。

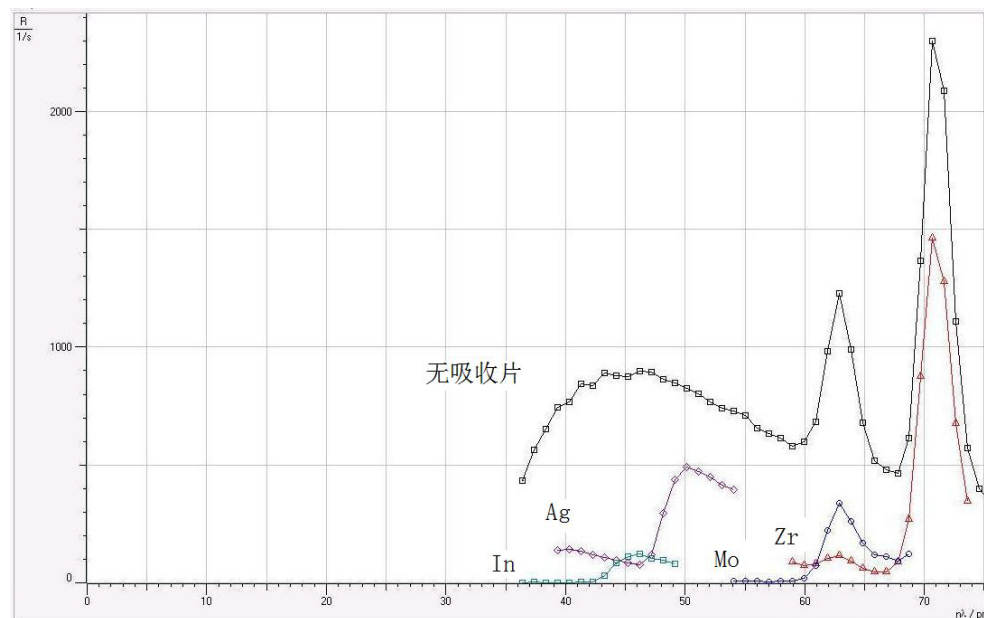
2) 检验莫塞莱定律：

用 NaCl 晶体

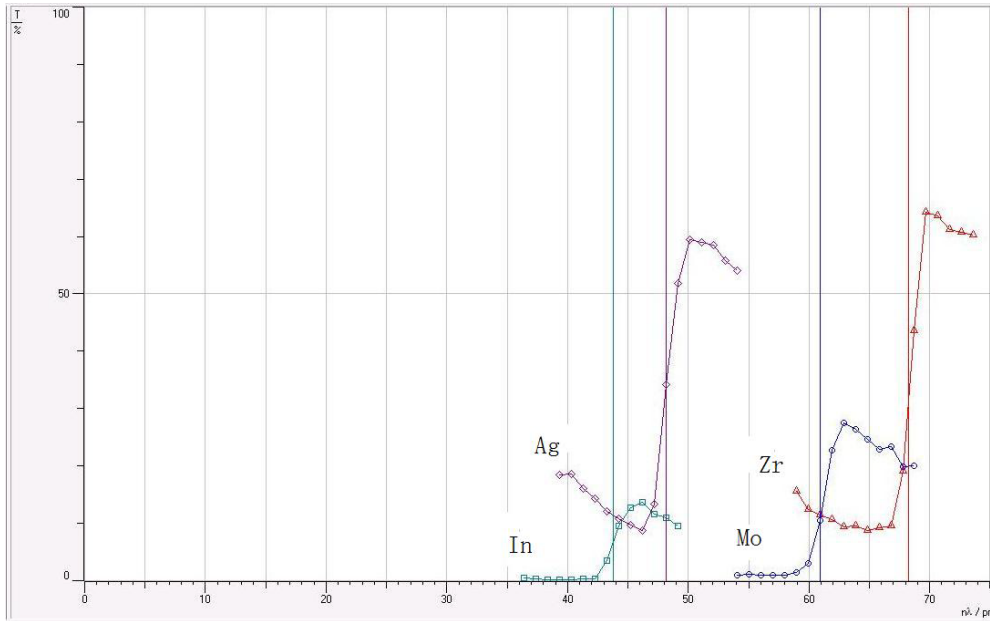
设置参数：U=35kV I=1mA $\Delta \beta = 0.1^\circ$ $\Delta t = 0.5s$

吸收片类型	β 的扫描范围
无吸收片	3.7° -7.7°
Zr 吸收片	6.0° -7.5°
Mo 吸收片	5.5° -7.0°
Ag 吸收片	4.0° -5.5°
In 吸收片	3.7° -5.0°

在上述五种情况下 NaCl 晶体的衍射谱如下图所示：

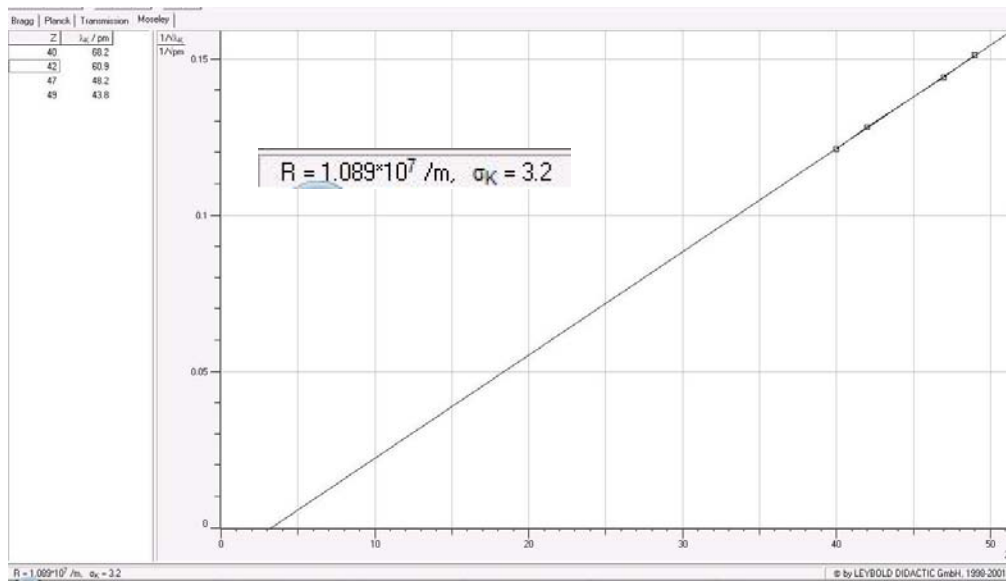


将上图的结果换到 transmission 窗口就得到透射谱如下图所示。



用软件自带功能进行吸收边的选取。(只选取直线部分)

在 moseley 窗口中依次输入四种材料的 Z 和 λ_k , 就得到如下的图像。



Zr、Mo、Ag 和 In 的 $\lambda_k^{-1/2}$ 和 Z 的函数关系图

从上图得到 $R=1.089 \times 10^7 /m$ $\sigma_k=3.2$

而理论值 $R=1.097373 \times 10^7 /m$ $\sigma_k=3.6$

R 的相对误差 0.763% 实验结果很理想

5. 实验讨论:

1) 调校测角器零点的时候, 先将靶台转 7.2° 的原因:

由布拉格反射定律 $2d \sin \beta = k\lambda, k = 1, 2, 3, \dots$ 其中 NaCl 晶体的 d 已知为 0.283nm

k 取 1 (因为 k 越大, β 就越大, 入射 x 光透射的就越多, 反射的就越少, 计数管的计

数就越少), λ 取 $\lambda = 7.11 \times 10^{-2} \text{nm}$ (因为 λ 大, 能量就小, 能量低的轨道电子数目本身就多, 所以跃迁的也就多), 代入可得 β 约为 7.2。

2) 莫塞莱定律和波尔原子轨道理论的关系:

根据波尔理论, 内壳层中 n 能级的公式

$$E_n = -Rhc \frac{(Z - \sigma_k)^2}{n^2}$$

X 射线若要电离 $n=1$ 的电子, 其能量必须大于该壳层电子的结合能

$$\frac{hc}{\lambda_k} = E_k = Rhc(z - \sigma_k)^2$$

$$\frac{1}{\lambda_k} = R(z - \sigma_k)^2$$

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda_k}} = \sqrt{R}(Z - \sigma_k)$$

得莫塞莱定律

6. 实验注意事项:

- 1) 实验所用晶体 NaCl 易碎易潮解, 做实验时要小心轻放, 拿晶体时要用手套, 防止手上的水渗入晶体。不用时放在干燥器中, 这样可延长其寿命。
- 2) GM 计数管计数不能超过 1500/s。但是在实际操作中不太能做到这一点, 所以在实验中若看到计数超过 1500 甚至达到 2000 时, 要尽快完成实验, 以延长 GM 计数管的寿命。
- 3) x 光管温度很高, 寿命也有限, 所以不进行实验时, 应及时关掉仪器。

致谢

感谢各实验室老师的指导和帮助, 尤其是俞熹老师, 自己才能顺利完成实验。也感谢搭档陈文婷, 因为彼此的配合和默契, 才能完成一学期的实验。

参考资料

- 1 近代物理实验补充材料
- 2 LEYBOLD 公司仪器说明书 LEYBOLD Physics Leaflets
- 3 基础物理实验 沈元华 陆申龙 高等教育出版社 2003