

X 光系列实验分析

06300720349 光科学与工程系 韩盾蛟

【摘要】: 利用德国 Leybold 公司的 X 光实验仪通过对 X 光进行两个实验: 测定 LiF 晶体的晶面间距、研究 X 光在材料中的衰减系数与波长及材料的原子序数关系来了解 X 光的部分基本原理, 对实验的结果进行了分析, 并作出合理的解释。

【关键词】: 线光谱 韧致辐射 X 光 朗伯定律 吸收系数 布拉格衍射

引言: 1895 年伦琴发现 X 光, 1912 年, 劳厄提出了 X 射线在晶体中衍射的理论, 并和他的助手用实验加以论证。我们把波长范围为 10^{-8}m 到 10^{-11}m 的电磁波称为 X 光, 它的产生原理是高速电子与原子中的内层电子相互作用, 使内层电子激发 (跃迁到外层) 或者电离 (脱离原子束缚), 从而在原子的内层形成空位, 于是, 外层电子向内层跃迁贴补空位, 发出波长长度较短的 X 光光子。

实验基础理论

1. 1913 年布拉格父子证明了当 X 光以 β 角入射到晶体时, 当该光的波长 λ 与晶面间距满足公式 $2d\sin\beta = n\lambda$ ($n=1, 2, 3\cdots$), 可以在反射角等于入射角的方向得到合成光强的极大, 该公式被称为布拉格公式。

2. 朗伯定律: X 光在某种材料中的衰减满足如下关系: $I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$ 。其中, I_0 是入射 X 光的强度, μ 为该材料的衰减系数, x 为该材料的厚度

3. 实验采用的产生 X 光的靶材料是钼, 当原子的第一层电子被高速电子激发或电离后, 第二第三层电子就会向第一层电子跃迁, 分别发出波长在 $7.11 \times 10^{-2}\text{nm}$ 附近 ($K\alpha$ 线) 和 $6.32 \times 10^{-2}\text{nm}$ 附近 ($K\beta$ 线) 的 X 光, 在光谱图上这类光是窄线的线光谱, 而与之对应的由原子核使高速电子偏转产生的电磁辐射, 这是另外一种 X 光的范围, 称为韧致辐射, 在光谱图上显示的是连续谱。

实验仪器

1. 实验使用的主要仪器为 Leybold 公司的 X 射线探测实验仪, 其包括 3 个工作区: A 监控区, B X 光管以及 C 实验区。A 为监控区, 包括电源和各种控制装置, 可控制靶台转动角度、X 光管所加高压、测量范围和测量频率等, 并且可通过液晶屏对计数管的计数等作直接观察。另外, 扫描得出的数据组以及拟合出来的曲线可以在与仪器连接的电脑屏幕上读出。B 为 X 光管, 工作式加以几万伏的高压, 电子在高压作用下轰击钼原子而产生 X 光, 钼靶为斜面, 以利于 X 光向水平方向射出。C 为实验区, 实验中将样品放在靶台 D 上, GM 计数管 E 可以调节角度, 用来接收并计数从特定方向射入的 X 光。

一 LiF 晶体的晶面间距的测量

实验的主要原理: 利用 X 光衍射符合布拉格衍射公式, 并通过实验得知掠射角 θ 和衍射级次 k , 以此来求得 LiF 晶体的晶面间距。实验过程是以掠射角 θ 为 x 轴来作扫描, 通过观察扫描图来找出 $K\alpha$ 线和 $K\beta$ 线发生衍射效应所对应的掠射角和其相应的级次, 由此应用布拉格衍射公式来算出晶面间距 d 。

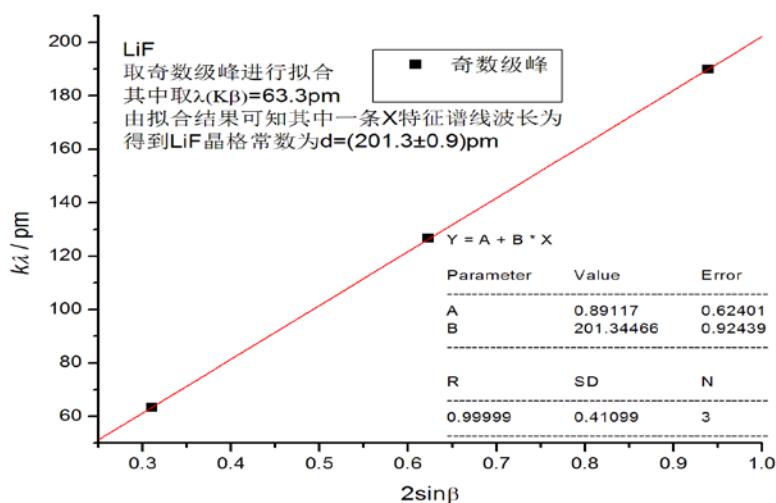
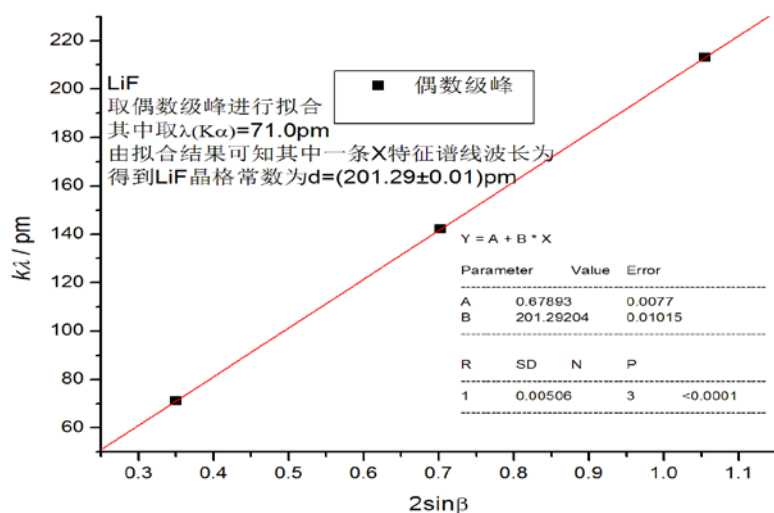
$$d = n\lambda / 2\sin\beta$$

$\beta / ^\circ$	8.94	10.06	18.14	20.55	28.02	31.83
------------------	------	-------	-------	-------	-------	-------

n	1	1	2	2	3	3
$n\lambda/\text{pm}$	63.3	71.0	126.6	142.0	189.9	213.0
$\sin\beta$	0.155	0.174	0.311	0.351	0.469	0.527
d/pm	204.0	204.0	203.5	202.2	202.4	202.6

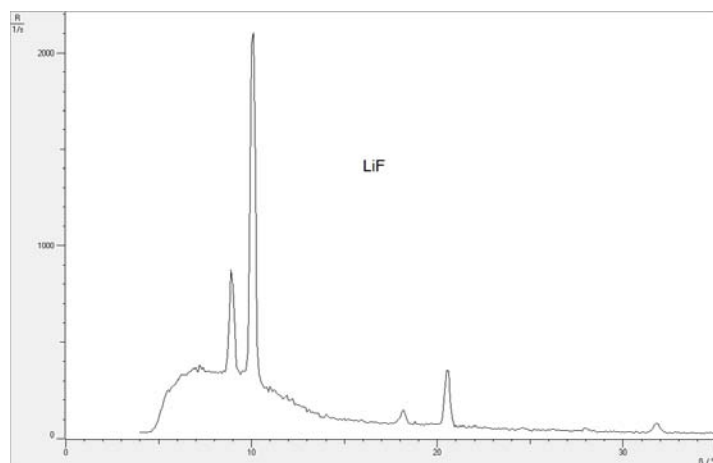
1. 对每个级次的每条线分别计算 d , 用此种方法算出的 LiF 的晶面间距 d 的平均值为 203.11pm
2. 对数据用 Origin 进行线性拟合, 由于我们的 X 光有两种波长, 分别是每个级次的奇数峰和偶数峰, 所以分别对奇数峰和偶数峰按布拉格衍射公式线性拟合, 得到
 当 $\lambda K\alpha = 63.3\text{pm}$ 时, $d_{\text{LiF}} = 201.30\text{pm}$
 当 $\lambda K\beta = 71.0\text{pm}$ 时, $d_{\text{LiF}} = 201.29\text{pm}$

拟合时的截图如下所示



结果的讨论一

经查阅固体物理有关书籍，得到 LiF 的晶面间距的理论值为 201.25pm.可以发现，采用 Origin 求斜率的拟合方式得到的实验值更加接近理论值，我想是因为用斜率的计算可以更好地避免因为数据抖动而带来的波动，而我们人工计算的理论值的误差也只在 0.9%中,可以说从一定程度上反应了实验仪器是比较精确的。



从我们在 X 光试验仪上截得的图上可以看出，图中的六个小峰就是原理中提到的线光谱，而在一级衍射峰周围的比较高的平台就是原理中的韧致辐射。而看每一级的衍射峰，都可以看到左边的峰明显比右边的峰低不少，原因是左边的峰对应的是 $K\beta$ 而右边对应的是 $K\alpha$ ， $K\beta$ 代表由原子内由第三层电子跃迁到第一层所发出的光子， $K\alpha$ 代表原子内第二层电子跃迁到第一层发出的光子，前者要消耗的能量比后者多，则发出的光子的能量也是 $K\beta$ 比 $K\alpha$ 高，由于光子的能量越高，波长越短，这也解释了为什么 $K\alpha$ 的波长比 $K\beta$ 的波长要略长。

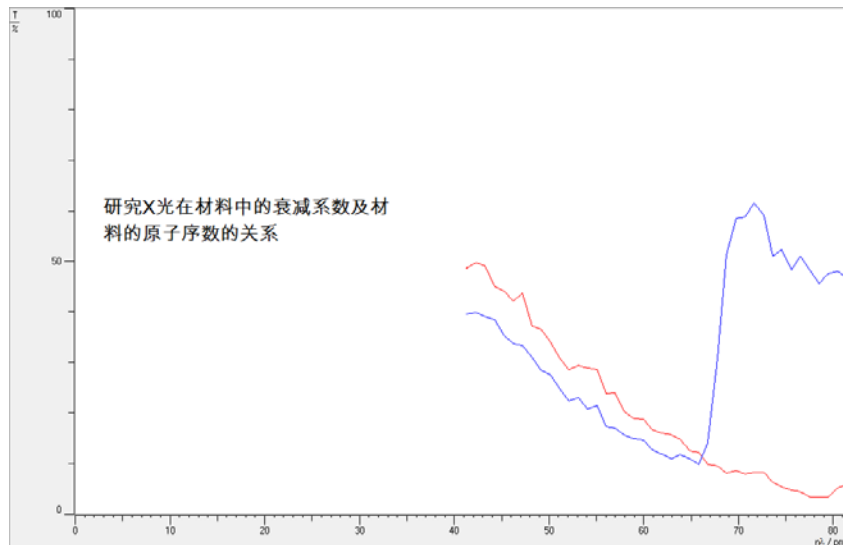
二 研究 X 光在材料中的衰减系数与波长及材料的原子序数关系

X 光的衰减系数满足朗伯定律，在远离材料吸收边界的区域，对不同波长 λ 的 X 射线，原子吸收系数满足下列关系： $\tau_a \propto \lambda^{-4}$ 通过在接收器前不加吸收片和分别加铜片、铝片时测量氯化钠晶体的衍射谱，得出不同波长 X 射线的透射率 $T=R/R_0=e^{-\mu x}$ ，由经验公式 $\tau_a = -(\ln T / \rho \times x) \cdot A/N_A - 0.2A/N_A$ (单位 cm^2/g) 求得 τ_a 。A 为原子摩尔质量， N_A 为阿伏加德罗常数， ρ 为密度，x 是材料的厚度。

$$\text{对于 Cu, } = -(63.55 / (6.02 \times 10^{-23})) \times \left(\frac{\ln T}{8.92 \times 0.007} - 0.2 \right)$$

$$\text{对于 Zr, } = -(91.22 / (6.02 \times 10^{-23})) \times \left(\frac{\ln T}{6.49 \times 0.005} - 0.2 \right)$$

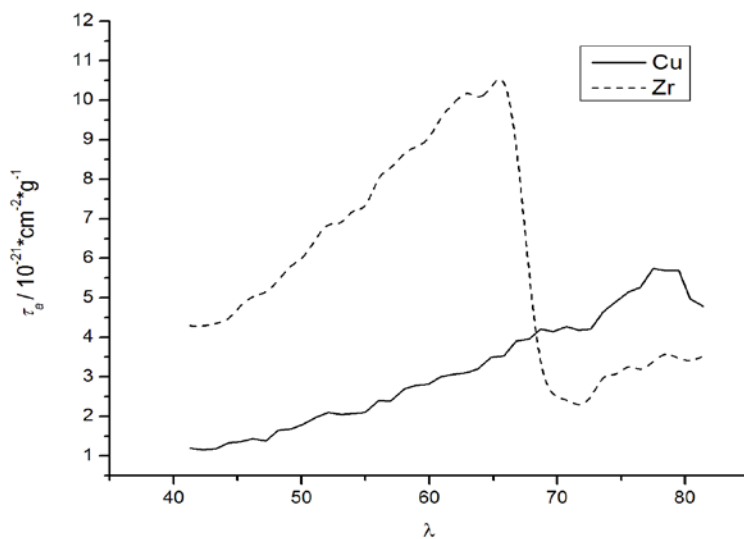
实验的透射率截图



蓝线代表 Zr 红线代表 Cu 横坐标代表波长 纵坐标代表透射率

由图可得，沿 X 轴的方向，在远离吸收边界的区域，随着 X 光的波长增大，能量减小，相应的透射率也在减小，而在同一波长处是 Cu 的透射率大于 Zr

把透射率考虑进入再采用理论中的经验公式用 Origin 拟合

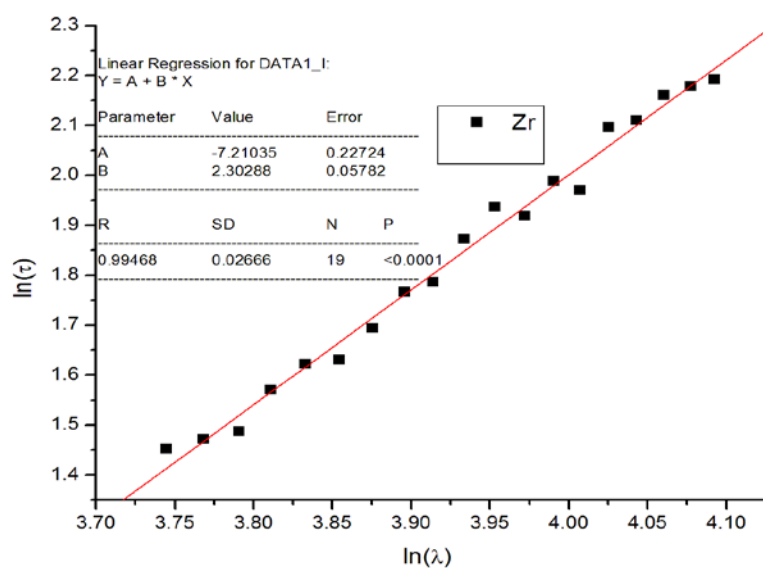
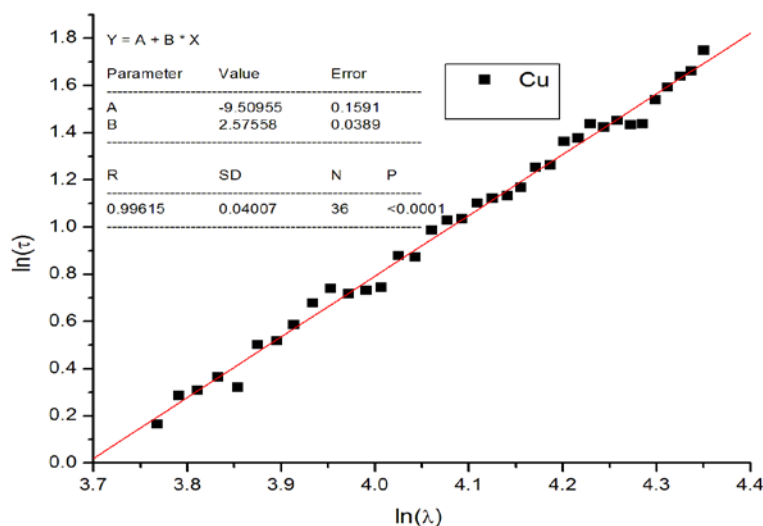


结果的讨论二

吸收截面可以说是一种概率的体现，吸收截面越大越大，物质吸收 X 射线的概率越大，表明 X 射线被吸收的越多，而 X 射线的波长越长，或者原子序数（质量数）越大，越容易吸收，而此时散射截面远小于吸收截面，吸收占主导作用。在远离吸收边界的区域沿 X 轴方向可以看到，X 光随波长的增大能量减小，于是我们可以看到吸收截面随这个趋势缓慢上升，对比 Cu 和 Zr 的图，可以很容易看出由于 Zr 的原子质量大于 Cu，Zr 的吸收截面始终比 Cu 的大。但是我们可以很清楚地看到一个拐点，这是因为当 x 光要电离某一层电子的时候，其能量必然要大于其结合能才能发生电离，即要求其波长要小于某个特定值 λ_k 。当入射 X 光波长小于并逐渐接近这个阈值时，越容易激发电离，既表现为吸收能力逐渐增大。但一旦波长超过 λ_k 的时候由于不能电离该层电子，吸收能力便会突然下降很多，这个突然下

降的地方就是所谓的吸收边，同时由于原子序数大，对电子的吸附能力大，即 Zr 同层电子对应的吸收边要比 Cu 超前一些，而由于测量范围的关系不能观察到 Cu 明显的吸收边。但是在 Cu 曲线末尾部分还是能够看得出来吸收系数有下降的趋势。

计算 α 的值，处理时设 $\tau = A \lambda^{-\alpha}$ ，采用两边取对数的方法拟合，则 $\ln \tau = \ln A + \alpha \ln \lambda$ ，这时采用 Origin 的线性拟合



得到的 Cu 的 α 为 2.57 Zr 的 α 为 2.30

最后我们得到的 X 光在材料中的衰减系数与波长和材料的原子序数的关系是在远离吸收边的区域，X 光的衰减系数随着波长的增加是增加的，同时也随着原子序数（也就是对应的相对原子质量）是增加的。

【小结】：德国 Leybold 公司的 X 光实验仪性能优良，通过实验能较好地了解 X 光的基本原理，验证了 X 光在理论上存在的线光谱和韧致辐射，对不同材料对于 X 光的吸收截面有了一个更为实际的了解，这些都会对我有关 X 光方面的深入学习有很好的帮助。

【致谢】: 感谢俞熹老师的悉心指导和我的搭档王轶超同学热情帮助。

【参考资料】: [1]近代物理补充试验讲义, 复旦大学物理教学实验中心

[2]固体物理导论, CHARLES KITTEL, 化学工业出版社

[3]近代物理, 郑广垣, 复旦大学出版社