

# 背散射法测量薄膜厚度实验报告

姓名\*

北京大学物理学院 学号: 2x000xxxxx

(实验日期: 2025 年 12 月 23 日)

## I. 理论原理

带电粒子束在原子核的库仑场作用下产生的散射现象叫作卢瑟福散射，背散射也就是大角度的卢瑟福散射，作为一种分析方法，迅速简便不需要对样品进行剥层处理，对样品无损，又能得到定量结果，尤其是它能获得样品表面下  $200\text{\AA}$ - $1\mu\text{m}$  深度范围内的信息，所以成为材料表面层分析的一种有力手段。

该实验涉及三个基本物理量，背散射运动学因子  $K$ ，能量损失因子  $[S]$  和微分散射截面  $\sigma$ ，用于分析材料的组成元素、元素的深度分布以及元素的组分比。

### A. 背散射运动学因子与质量分辨

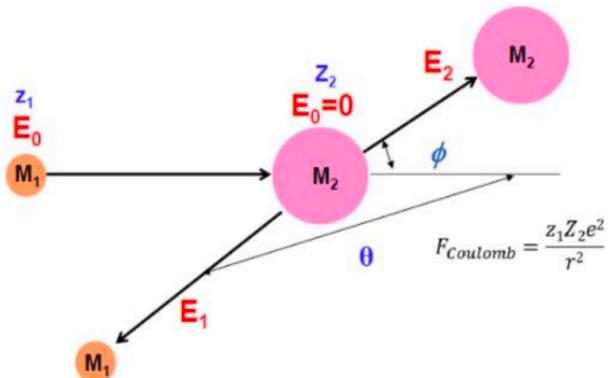


图 1. 带电粒子打在样品上的运动学关系图

如图 1 所示，一质量为  $M_1$  的带电粒子，以一定的能量  $E_0$  入射到靶上，与静止的靶原子  $M_2$  碰撞，发生了动量和能量转移。如果在碰撞过程中无核反应发生，则通过动量和能量守恒定律能够推导出一系列物理量之间的关系。考虑得到散射粒子的能量

$$E_1 = KE_0, \quad (1)$$

其中  $K$  为背散射运动学因子，在实验室坐标系中有

$$K = \left[ \frac{(M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta)^{1/2} + M_1 \cos \theta}{M_1 + M_2} \right]^2 = K(M_1, M_2, \theta). \quad (2)$$

\* email@pku.edu.cn; (86)1\*\*\*\*\*

当入射粒子的质量，能量和探测角度已知时， $E_1$  或者运动学因子  $K$  与  $M_2$  成单值函数关系。所以，通过测量一定角度下散射粒子的能量，就可以确定靶原子的质量数  $M_2$ ，定出靶材料的组成元素。

根据 式 (2) 和误差传递公式，可以得到

$$\Delta M_2 = \frac{\Delta E_1}{E_0} \left( \frac{dK}{dM_2} \right)^{-1}, \quad (3)$$

$\Delta M_2$  代表 RBS 方法能够区分的两个不同靶的质量差，即质量分辨。我们希望  $\Delta M_2$  越小越好，影响质量分辨主要因素为式 (3) 中的各物理量：

1.  $\Delta E_1$ ：探测器的能量分辨率。根据 Bethe-Block 公式，入射粒子的  $z_1$  越高， $\Delta E_1$  越大（与  $z_1^2$  成正比），质量分辨越差。所以，从提高质量分辨的角度来说，优先选择  $z_1$  值小的轻元素作为入射粒子。
2.  $E_0$ ：入射粒子的能量。入射能量越高，质量分辨越好。但是，入射能量高了，会发生很多非卢瑟福散射的核反应，像融合蒸发、弹散、非弹和转移等。所以，能量也不能太高。
3.  $(dK/dM_2)^{-1}$ ：与入射粒子的质量  $M_1$ ，靶原子的质量  $M_2$ ，以及散射角度  $\theta$  有关。入射粒子的质量  $M_1$  越大，靶原子的质量  $M_2$  越小， $dK/dM_2$  值越大，质量分辨越好。且散射角度越大，不同的靶元素越容易区分。当然，考虑到束流有一定的尺寸，很难把测量散射粒子的探测器放置在接近 180 度的地方。通常来说，我们会放置在 165（或者 160）度左右，既能保证区分元素的灵敏性，又能保护探测器不被高流强的入射粒子损坏。以及从提高质量分辨的角度来考虑，卢瑟福背散射实验通常采用  $Z \sim 1 - 7$ ， $E_0$  约为几个 MeV 的核作为入射粒子。

## B. 能量损失因子与深度分辨

粒子在某固体中做直线运动的过程中，粒子主要通过与靶原子的电子相互作用而损失能量。对于不同厚度的靶，入射粒子的能量损失是不相同的，反应在背散射能谱上就是不同程度的向低能方向拓展。我们可以根据能谱的展宽来测量靶的厚度。

如图 2 所示，假设能量为  $E_0$  的粒子以角度  $\theta_1$  入射，在厚度为  $x$  的靶上发生背散射后，以角度  $\theta_2$  出射。在同一角度，探测到的被靶表面靶原子散射的粒子能量  $KE_0$  和被深度  $x$  处靶原子散射的粒子能量  $E_1$  之差为：

$$\Delta E = KE_0 - E_1 = K \int_0^{x/\cos\theta_1} \left[ \frac{dE}{dx}(x) \right]_{in} dx + \int_0^{x/\cos\theta_2} \left[ \frac{dE}{dx}(x) \right]_{out} dx. \quad (4)$$

当入射和出射路径上的能量损失用一个常量（如平均能量损失率）来代替时，得到了  $\Delta E$  同深度  $x$  的关系为： $\Delta E = [S]x$ 。其中，

$$[S] = \left[ \frac{dE}{dx}(x) \right]_{E_0} \frac{K}{\cos\theta_1} + \left[ \frac{dE}{dx}(x) \right]_{KE_0} \frac{1}{\cos\theta_2}, \quad (5)$$

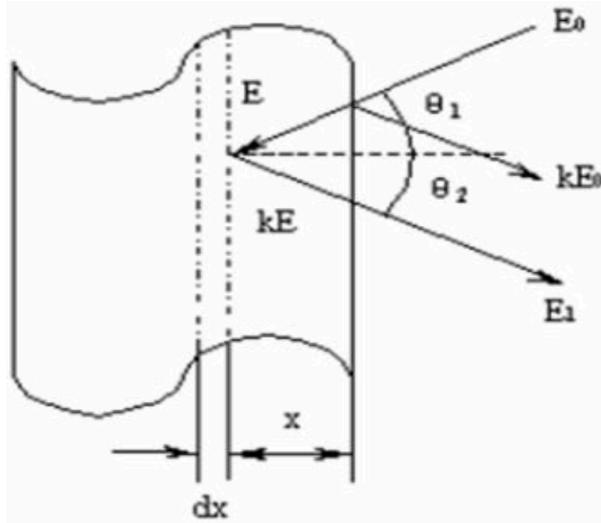


图 2. 粒子入射到靶深  $x$  处的背散射示意图

其中,  $[S]$  称为能量损失因子. 这样, 通过  $[S]$  或者我们只要得到的  $\Delta E$ , 就能求出相应的深度  $x$ , 因此背散射分析可以作为深度分析的手段, 被称作深度显微镜. 入射粒子的  $z$  越大,  $[S]$  越大. 所以, 同样的能损,  $[S]$  越大,  $dx$  越小, 深度分辨越好. 所以可以得到深度分辨与入射粒子和靶原子以及入射与出射的角度相关.

### C. 微分散射截面与元素含量分析

卢瑟福微分散射的截面公式为:

$$\sigma(\theta) = \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{2E_0 \sin^2 \theta} \right)^2 \frac{\{\cos \theta + [1 - (M_1/M_2 \sin \theta)^2]^{1/2}\}^2}{[1 - (M_1/M_2 \sin \theta)^2]^{1/2}}, \quad (6)$$

表示在  $\theta$  角处单位立体角中的每个靶原子的有效散射截面. 如果单位面积薄靶中所含原子个数为  $Nx$ , 入射的粒子总数为  $n$ , 则在单位立体角中接受的散射的粒子数目为:

$$\frac{dA}{d\Omega} = nNx\sigma, \quad (7)$$

由于探测器所张立体角  $\Omega$  很小, 可以认为此范围内的  $\sigma$  为常数, 那么有

$$A = nNx\sigma\Omega. \quad (8)$$

根据已经知道的  $n, \Omega, \sigma$  与测量得到的  $A$ , 就可以定出  $Nx$ . 但是, 绝对的  $n, \Omega$  测量是非常困难的, 实际上常用相对比较的方法求得单位面积上的靶原子数目, 进而分析出各元素的含量.

## II. 实验条件

本实验的装置如图 3 所示. 串列加速器产生的  $\alpha$  离子束, 经过分析磁铁进入背散射束线管道, 再经过两个准直狭缝, 使打到靶盘上的束斑尺寸不超过  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ . 实

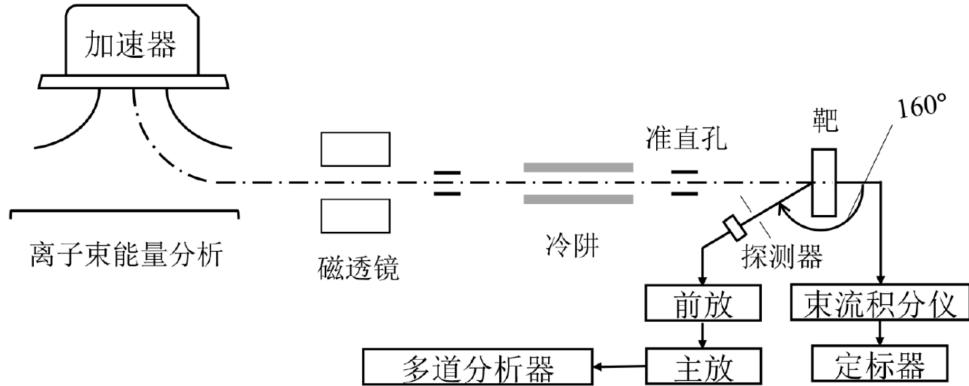


图 3. 实验装置示意图

验样品边长一般 5 mm-10 mm，通过导电胶粘到圆形靶盘上，靶盘固定在转角仪上，样品位置通过距圆盘中心的长度及角度来标记。为了确定束斑位置，可在靶盘上粘贴一小块石英片。实验前使离子束打在石英片上，作为基准位置，实验时将所测样品转到束斑所在位置。靶盘引出线串接 +300 V 电池后再接入束流积分器，加正高压的目的是为了抑制二次电子。

$\alpha$  粒子打在样品靶上发生卢瑟福背散射，然后被安装在一定角度上的探测器测量。得到的信号被后续的前置放大器和主放大器放大后，进入多道分析器。由于  $\alpha$  粒子在空气中的射程很短，因此反应需要在真空靶室中进行。探测器为金硅面垒探测器。装有液氮的冷阱用来减少在靶室中的碳氢化合物的沾污。束流积分器用来记录束流的大小，即入射粒子的总数。束流积分器与计数器可测量入射离子的电荷量，并通过计数器反馈给多道分析器一个 GATE 信号，可以控制多道分析器是否有输出。

### III. 实验结果及讨论

本组同学的实验内容为进行能量刻度——标样，标样样品为硅衬底上，从里到外分别镀上了非常薄的 Ni, Ge, Pd, Au 层。我们可以清晰地看到 Au、Pd、Ni 三个元素的背散射峰以及 Si 衬底的反散射峰边沿。我们可以通过分别找到这一系列峰的峰位（或者右边沿）所对应的道数，将这些元素的  $K$  因子对应道数做线性拟合，根据这条直线就可以对多道分析器进行能量刻度，确定能量和道数的对应关系。

我们利用 SIMNRA 程序完成这样的过程，得到的能谱图和拟合图如图 4 所示，标定出的参数设置如图 5 所示。

### 致谢

感谢潘悦同学协力完成了本实验，感谢楼建玲老师和徐川老师在实验中的讲解和指导。

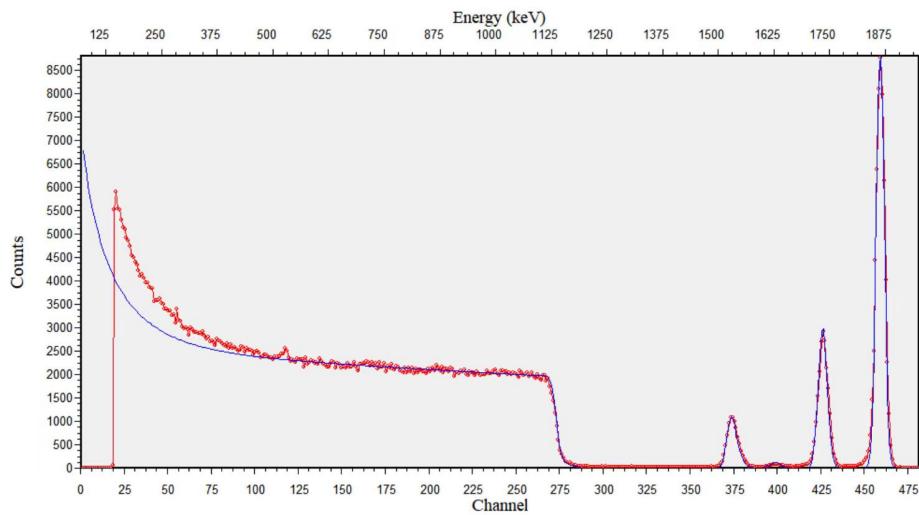


图 4. 标样的背散射实验谱和 SIMNRA 计算谱

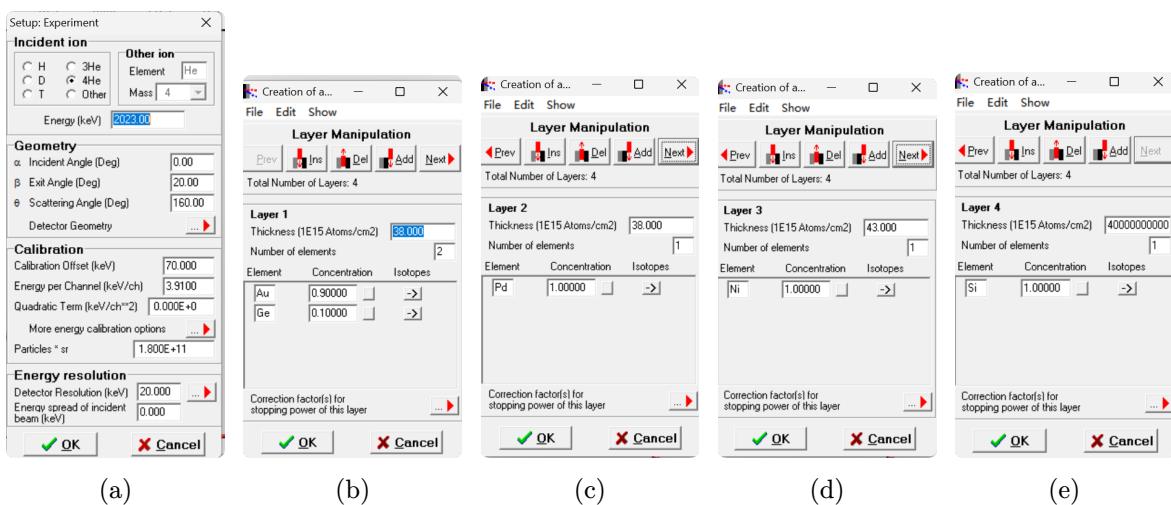


图 5. 定标的参数设置

## 附录 A: 思考题

### 1. 试从提高质量分辨率与深度分辨率的角度说明应如何选择入射粒子的种类？

为了提高质量分辨率，应该尽量选择低  $Z_1$  的入射粒子，减少  $\Delta E$ ，提高质量分辨；为了提高深度分辨，应该相应选择高  $Z_1$  的入射粒子，能量损失因子  $[S]$  更大，深度分辨越高。所以在尽量保持高质量分辨率的情况下考虑深度分辨率，我们选择了  $^4\text{He}$  作为入射粒子。

### 2. 试述入射粒子的能量选择受到哪些因素的限制？

1. 能量不能太低，要保证能够发生完整的卢瑟福散射；能量不能太高，避免非卢瑟福散射和样品的损伤风险。
2. 探测器能量分辨率限制，不同的入射粒子选择，也限制了入射粒子的能量选择。
3. 深度分辨率限制，当能量过低与过高时，都会影响  $dE/dx$  的线性效应。
4. 加速器能力与束流稳定性，为了产生稳定的入射粒子束流，也限制了入射粒子的能量选择。

### 3. 应怎样考虑选择散射角的大小？

因为散射角度越大，不同的靶元素越容易区分，所以优先选择大散射角，但是因为束流有一定的尺寸以及实验装置的几何空间限制，所以一般来说会选择在 160 度与 165 度左右。

### 4. 实验中观察到的谱宽由哪些因素决定，同一块靶有时会得出不同的谱形宽度，为什么？

由仪器固有展宽——电子学噪声、探测器能量分辨率、加速器能量稳定性和靶厚度共同决定。因为样品厚度本身在空间上就存在不均匀性，束斑也存在不均匀性，束流参数与探测器也会有时间上的固有波动。