

半导体 α 谱仪和 α 粒子能量损失实验报告

姓名^{*}

北京大学物理学院 学号: 2x000xxxxx

(实验日期: 2025 年 11 月 25 日)

I. 理论原理

A. 半导体 α 谱仪

金硅面垒型半导体 α 谱仪具有能量分辨率高、能量线性范围宽、脉冲上升时间快、体积小和价格便宜等优点，在 α 粒子及其它重带电粒子能谱测量中有着广泛的应用。

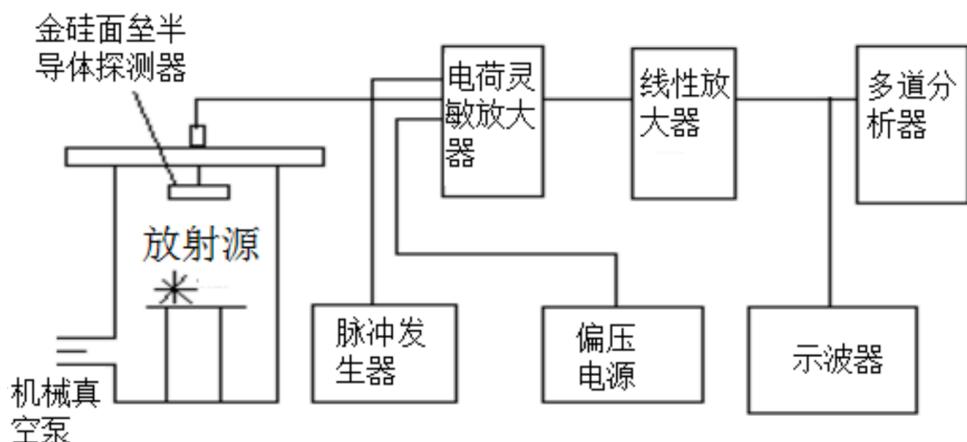


图 1. 半导体 α 谱仪的组成示意图

图 1 是半导体 α 谱仪的组成示意图，金硅面垒探测器是用一片 N 型硅，蒸上一薄层金，接近金膜的那一层硅具有 P 型硅的特性，这种方式形成的 PN 结靠近表面层，结区即为探测粒子的灵敏区。探测器工作加反向偏压。 α 粒子在灵敏区内损失能量转变为与其能量成正比的电脉冲信号，经前置放大器及主放大器的放大，由多道分析器测出幅度的分布，从而给出带电粒子的能谱。5 MeV 左右的 α 粒子在空气中的射程仅为 3.8 cm。因此，为了提高谱仪的能量分辨率，探测器要放在真空中。另外，金硅面垒探测器一般具有光敏的特性，在使用过程中，应有光屏蔽措施。例如：打开真空靶室时，一定要退掉探测器的偏压，关闭前置放大器的电源。

B. α 谱仪的能量刻度

谱仪的能量刻度就是确定 α 粒子能量与脉冲幅度之间的对应关系，脉冲幅度大小以谱线峰位在多道分析器中的道址表示。本实验使用单能 α 源和脉冲发生器的刻度方法。

^{*} email@pku.edu.cn; (86)1*****

利用一个已知能量的单能 α 源，配合线性良好的精密脉冲发生器来作能量刻度，这是在 α 源种类较少的实验条件下常用的方法，本实验中利用 ^{239}Pu 源的 5.155 MeV 的 α 粒子作为已知能量的单能 α 源，调解脉冲放大器的“幅度旋钮”到 5.155 V 的位置，同时调节“校正旋钮”使即发生器脉冲与 α 源的峰位相同，校准精密脉冲发生器。

固定脉冲发生器的校正旋钮位置不变的情况下，分别将“幅度旋钮”调节到不同位置，测量出相应的能谱峰的峰位，进行线性拟合后得到相应的能量刻度，再利用这样的能量刻度曲线就可以确定 α 粒子的能量。

C. α 粒子在介质中的能量损失

带电粒子在吸收内单位长度上的能量损失，称为线性阻止本领 S ，

$$S = -\frac{dE}{dx}. \quad (1)$$

常把 S 除以吸收体单位体积内的原子数 N ，称为阻止截面，用 Σ_e 表示，并取 $\text{eV}/10^{15} \cdot \text{AOTM}$ 为单位，即：

$$\Sigma_e = -\frac{1}{N} \frac{dE}{dx} \quad (2)$$

能量在 1 keV 到 10 MeV 之间的 ^4He 离子在铝中的阻止截面，可以用曲线拟合得到经验公式表示为：

$$\Sigma_e = -\frac{A_1 EA_2 \left\{ \frac{A_3}{E/1000} \ln \left[1 + \frac{A_4}{E/1000} + \frac{A_5 E}{1000} \right] \right\}}{A_1 EA_2 + \frac{A_3}{E/1000} \ln \left[1 + \frac{A_4}{E/1000} + \frac{A_5 E}{1000} \right]}. \quad (3)$$

其中 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 都为常数，查表可得对于 Al 元素靶，阻止截面的系数分别为：

$$\begin{cases} A_1 = 2.5, \\ A_2 = 0.625, \\ A_3 = 45.7, \\ A_4 = 0.1, \\ A_5 = 4.359. \end{cases}$$

当能量为 E_1 的带电粒子，穿过厚度为 x 的薄吸收体后其能量变为 E_2 ，这一能量变化可以表示为：

$$\Delta E = E_1 - E_2 = -\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{平均}} \Delta x. \quad (4)$$

所以利用已知的阻止截面值，通过 α 粒子在薄箔中的能损的测量，可以快速无损的测定薄箔的厚度

$$\Delta x = \frac{\Delta E}{-\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{平均}}}. \quad (5)$$

II. 实验条件

给探测器加上 30 V 的偏压后, 通过调节放大倍数将此时放射源的谱线峰位落在 2000-2100 道之间, 确定了合适的放大倍数为 2 倍.

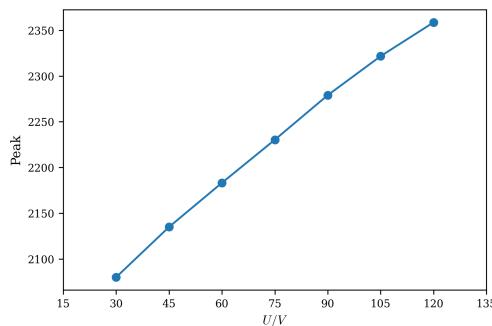
固定了合适的放大倍数后, 逐渐调整偏压值至 120 V, 以寻找最佳偏压值, 如表 I 和 表 II 所示.

表 I. 峰位随偏压的变化

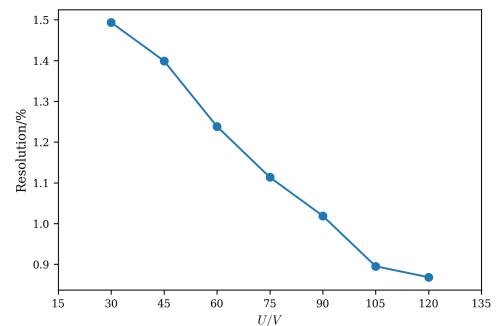
偏压 U/V	峰值
30	2080.11
45	2135.01
60	2183.26
75	2230.31
90	2279.02
105	2321.66
120	2358.55

表 II. 分辨率随偏压的变化

偏压 U/V	FWHM	分辨率
30	76.99	1.49%
45	72.12	1.40%
60	63.83	1.24%
75	57.40	1.11%
90	52.52	1.02%
105	46.14	0.90%
120	44.75	0.87%



(a) 峰位随偏压的变化



(b) 分辨率随偏压的变化

图 2. 寻找最佳偏压值

图 2a 给出了峰位随偏压的变化, 图 2b 给出了分辨率随偏压的变化, 由图得出了最佳偏压值为 120 V.

III. 实验结果及讨论

首先, 在 120 V 偏压下, 测量 1200 s 无膜时的能谱, 结果得到峰位为 2362.48 道, 总计数为 35131, 净计数为 25794, 满足标准误差 $1/\sqrt{N} < 1.5\%$ 的要求.

其次, 在 120 V 偏压下, 测量 1200 s 有膜时的能谱, 结果得到峰位为 1992.79 道, 总计数为 44675, 净计数为 22415, 同样满足标准误差 $1/\sqrt{N} < 1.5\%$ 的要求.

再次, 进行能量刻度如表 III 所示:

表 III. 能量刻度

幅度 U/V	峰位道数
6.0	2738.79
5.5	2514.65
5.0	2292.91
4.5	2068.35
4.0	1844.98
3.5	1480.03
3.0	1397.00

由 7 组数据拟合得到能量刻度关系为

$$Y = 0.002120131X + 0.157756. \quad (6)$$

最后, 将数据代入到自动化软件中计算得到吸收膜厚度 $\Delta x = 4.661\,067\,8 \mu\text{m}$, 误差较大, 可能是由于上次实验后真空腔体内吸入机油所致.

致谢

感谢潘悦同学协力完成了本实验, 感谢许金艳老师在实验中的讲解和指导.

附录 A: 思考题

1. 利用 α 谱仪测量的 ^{241}Am 和 ^{239}Pu 的能谱图为什么是非高斯对称的？

主要是因为 α 粒子能量损失涨落的非对称性，尤其是放射源的厚度和探测器的窗后的不均匀性，会导致比理论谱线更多的能量损失的 α 粒子数据被收集到，这种能量损失的不均匀性会导致在谱线上显示出“低能拖尾”，谱线向低能方向不对称展宽。

除此之外，真空室的密封不严和 α 粒子射线方向的偏斜也均会导致不均匀的能量损失造成“低能拖尾”，谱线向低能方向不对称展宽。

2. 试定性的讨论 α 粒子穿过吸收体展宽的原因。

1. 吸收体自身特性引起的展宽

- (a) 展宽的主导因素就是吸收体的厚度不均匀性，存在微观厚度的涨落导致统计分散性进而引起展宽。
- (b) 材料结构非均匀性：吸收体的晶粒取向差异或杂质分布不均，导致阻止本领的局部涨落，进一步加剧能谱展宽。

2. α 粒子与吸收体相互作用的物理机制

- (a) 能量损失过程的统计涨落： α 粒子与物质原子电子碰撞的随机性仍会导致能量损失存在涨落。
- (b) 多次小角度散射的累积效应也会增强能量损失的涨落。

3. 实验条件的影响

- (a) 入射角度非严格垂直正入射的分布展宽也会导致能谱展宽。
- (b) 真空残留气体也会导致能谱展宽。

3. 设阻止本领 $[S]$ ，薄膜厚度为 Δx ，试计算 α 粒子倾斜入射，与表面法线夹角为 4 度和 6 度时的能损为多少。

当 α 粒子以角度 θ 倾斜入射时，实际穿过的膜厚增加到 $\Delta x / \cos \theta$ ，因此能量损失为：

$$E_\theta = \frac{[S]\Delta x}{\cos \theta}.$$

$\theta = 4^\circ$ 时，

$$E_{4^\circ} = \frac{[S]\Delta x}{\cos 4^\circ} = \frac{[S]\Delta x}{0.9976} = 1.0024[S]\Delta x.$$

$\theta = 6^\circ$ 时，

$$E_{6^\circ} = \frac{[S]\Delta x}{\cos 6^\circ} = \frac{[S]\Delta x}{0.9945} = 1.0055[S]\Delta x.$$

4. 探测器的金层厚 10 nm, 试计算 ^{241}Am 的 α 粒子进入灵敏区时的能量. 已知金的密度为 $19.31 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 阻止本领为 $0.228 \text{ keV}/\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$.

α 粒子在金层损失的能量为

$$\Delta E = [S] \times \Delta x = [S] \times \rho \times d = 0.228 \times 19.31 \times 10^6 \times 10 \times 10^{-7} \approx 4.40 \text{ keV}.$$

α 粒子进入灵敏区时的能量为

$$E = E_0 - \Delta E = 5485 - 4.40 = 5480.6 \text{ keV}.$$

5. 解释脉冲幅度和分辨率随偏压变化曲线的特征, 并说明选择探测器偏压应该考虑哪些因素?

脉冲幅度变化特征: 先上升后在高位波动, 因为初始阶段收集到的信号自然随偏压增加直到饱和, 饱和后产生统计涨落变化曲线在高位波动.

分辨率变化特征: 先快速改善分辨率降低后再次提高, 因为入射电子的能量和电荷数据完全被收集以及提高偏压、降低结电容可以很好地减少噪声, 增加信号幅度, 提高信噪比, 从而改善探测器的能量分辨率, 但偏压过高时, 探测器的漏电流也会增大而使分辨率变坏.

应该考虑到:

1. 入射粒子的能量全部损耗在灵敏区中.
2. 所产生的电荷完全被收集, 电子空穴复合和陷落的影响可以忽略.
3. 能量分辨率最低.
4. 低于探测器击穿电压. (所以本实验中最大偏压只调节到了 120 V)

6. 用脉冲发生器模拟不同能量的 α 粒子时, 为什么通常不关闭偏压电源?

1. 保持探测器工作状态的等效性, 防止结电容等探测器工作状态的改变.
2. 维持电荷灵敏放大器的线性响应, 同样也是保持探测器工作状态的等效性.
3. 维持电子学噪声基线, 防止偏压电源的改变导致的电子学噪声导致的波动.

7. 有 $\Delta E = (\Delta E_n^2 + \Delta E_D^2 + \Delta E_e^2 + \Delta E_s^2)^{1/2}$, 如何从实验上分别测出探测器及电子学噪声对谱线所造成的展宽?

a. 电子学噪声

断开探测器, 直接接入脉冲发生器, 使用完全相同的电子学参数并测量能谱计算相应的电子学噪声展宽 ΔE_e .

b. 探测器噪声

可以通过制备超薄单能 α 源，制备极高真空环境，并用低温测量抑制统计涨落，抑制 ΔE_n 与 ΔE_s 后，通过测量总展宽并计算去除电子学噪声后的展宽，得到探测器固有噪声展宽.