

半导体探测器与 α 粒子能损实验

赵宇航

摘要: 本实验以放射源 ^{241}Am 放射源分别通过1-7层铝箔和Mylar膜, 测量了通过后的粒子能量, 借以拟合了单层铝箔和Mylar膜的厚度。

1 实验目的

1. 了解 α 粒子通过物质时的能量损失及其规律。
2. 学习从能损测量求薄箔厚度的方法。

2 实验原理

天然放射性物质放出的 α 粒子, 能量范围是388MeV。在这个能区内, α 粒子的核反应截面很小, 因此可以忽略。 α 粒子与原子核之间虽然有可能产生卢瑟福散射, 但几率较小。它与物质的相互作用主要是与核外电子的相互作用。 α 粒子与电子碰撞, 将使原子电离、激发而损失其能量。在一次碰撞中, 具有质量为 m , 能量为 E 的带电粒子, 转移给电子(质量为 m_0)的最大能量约为 $\frac{4Em_0}{m}$, α 粒子的质量比电子大得多, 所以每碰撞一次, 只有能量的一小部分转移给电子。当它通过吸收体时, 经过多次碰撞后, 才损失较多能量。每一次碰撞后, α 粒子的运动方向基本上不发生偏转, 因而它通过物质的射程几乎接近直线。带电粒子在吸收体内单位路程上的能量损失即能量损失率 $-\frac{dE}{dx}$, 称为线性阻止本领 S 。

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

它的单位是 erg/cm , 实用上常换算成 $\text{KeV}/\mu\text{m}$ 或 eV/gcm^2 。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

常取 $\text{eV}/10^{15}\text{atom}\cdot\text{cm}^2$ 为单位。

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

对非相对论性 α 粒子 ($v \ll c$), 线性阻止本领用下面式子表示:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 N Z}{m_0 v^2} \ln \frac{2m_0 v^2}{I} \quad (3)$$

(3)式中的 z 为入射粒子的电荷数, Z 为吸收体的原子序数, e 为电子的电荷, v 为入射粒子的速度, N 为单位体积内的原子数, I 是吸收体中的原子的平均激发能。(3)式中, 对数项随能量的变化是缓慢的, 因此(3)式可近似表示为

$$\frac{dE}{dx} \propto -\frac{C}{E} \quad (4)$$

C 为一常数。

当 α 粒子穿过厚度为 ΔX 的薄吸收体后, 能量由 E_1 变为 E_2 , 可以写成

$$\Delta E = E_1 - E_2 = -\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ave} \Delta X \quad (5)$$

$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ave}$ 是平均能量 $\frac{E_1+E_2}{2}$ 的能量损失率。这样测定了 α 粒子在通过薄箔后的能量损失 ΔE , 则利用(5)式, 可以求薄箔的厚度, 即

$$\Delta X = \frac{\Delta E}{-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ave}} \approx \frac{\Delta E}{-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{E_1}} \quad (6)$$

当 α 粒子能量损失比较小时, (6)式中的阻止本领可用入射能量 E_1 时之值; 当箔比较厚时, α 粒子的能量在通过箔后能量损失大时, (6)式就应表为

$$\Delta X = \int_{E_2}^{E_1} \frac{dE}{-\frac{dE}{dx}} \approx \sum_{E_2}^{E_1} \frac{\delta E}{\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{E_1}} \quad (7)$$

(4)式中 δE 可取 $10keV$ ，在这范围内，将 S 看作常量。

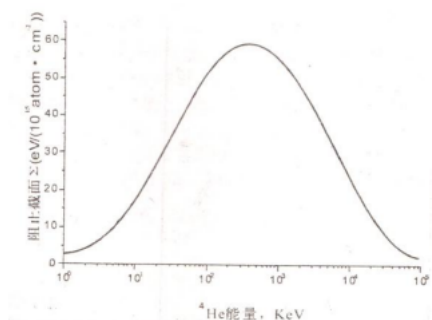


图 3-1 He 离子在铝中的阻止截面与能量关系

图表示 4He 离子在铝中的阻止截面与能量关系的实验结果。能量在 $1KeV \sim 10MeV$ 之间的 4He 离子在铝中的阻止截面，可用曲线拟合得到的经验公式表示为

$$\sum_e = \frac{A_1 E^{A_2} \left(\frac{A_3}{E/1000} \ln \left[1 + \frac{A_4}{E/1000} + \frac{A_5 E}{1000} \right] \right)}{A_1 E^{A_2} + \frac{A_3}{E/1000} \ln \left[1 + \frac{A_4}{E/1000} + \frac{A_5 E}{1000} \right]} \quad (8)$$

式中的 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 为常数，见表1。 4He 离子的能量以 keV 为单位，得到 \sum_e 以 $eV/10^{15}atom \cdot cm^2$ 为单位。对于化合物，它的阻止本领可由布拉格相加规则，将化合物的各组成成份的阻止本领 $(\frac{dx}{dE})_i$ 相加得到，即

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_e = \frac{1}{A_e} \sum Y_i A_i \left(-\frac{dE}{dx} \right)_i (KeV/\mu gcm^{-2}) \quad (9)$$

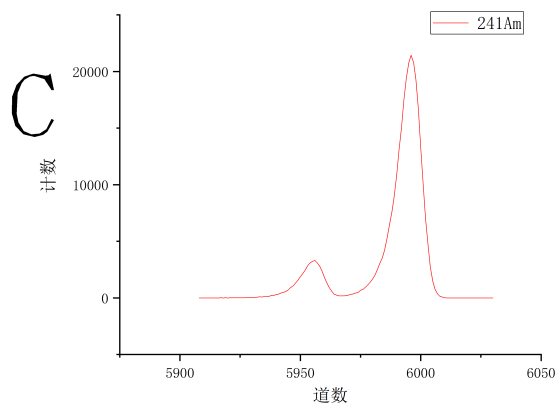
表 1 低能氦离子阻止本领的系数（固体）

靶	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
H[1]	0.9661	0.4126	6.92	8.831	2.582
C[6]	4.232	0.3877	22.99	35	7.993
O[8]	1.776	0.5261	37.11	15.24	2.804
Al[13]	2.5	0.625	45.7	0.1	4.359
Ni[28]	4.652	0.4571	80.73	22	4.952
Cu[29]	3.114	0.5236	76.67	7.62	6.385
Ag[47]	5.6	0.49	130	10	2.844
Au[79]	3.223	0.5883	232.7	2.954	1.05

其中 Y_i 、 A_i 分别为化合物分子中的第 i 种原子的数目、原子量， A_e (等于 $\sum Y_i A_i$)是化合物的分子量。利用已知的阻止截面，通过 α 粒子在薄箔中能损的测量，可以快速无损的测定薄箔的厚度， α 粒子的能量可用多道分析器测量，峰位可按最简单的重心法得到。

3 实验结果

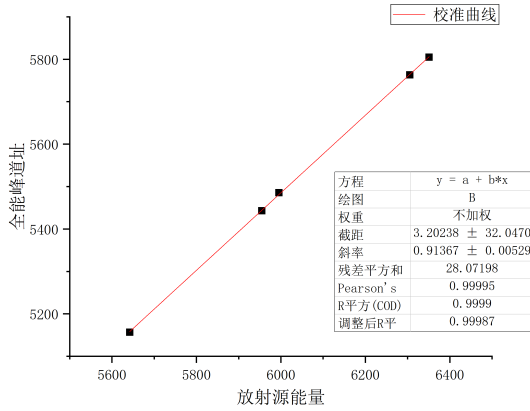
将测量的 ^{241}Am α 谱以多道的道数为横坐标，以计数为纵坐标描绘在坐标纸上，如下图所示



结合图形由实验数据知其峰值处能量分别为 $5954.79keV$ 、 $5995.23keV$ ，半高宽分别

为 11.8899keV , 11.5963keV 。由能量分辨率定义知两个峰能量分辨率分别为 0.1997% , 0.1934% 。

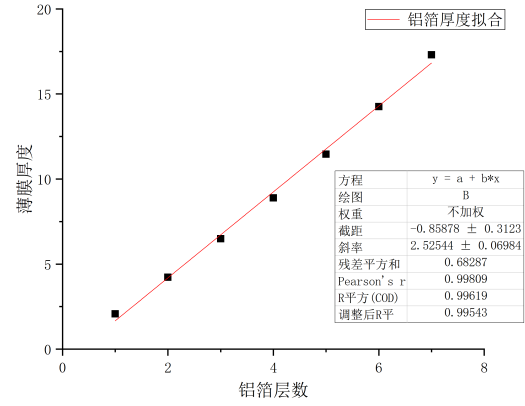
根据实际实验情况, 我们以放射源 ^{241}Am 、 ^{239}Pu 、 ^{244}Cm 放射源的能量为横坐标, 以全能峰道址为纵坐标在坐标纸上作出校准曲线, 如图所示。



3.1 Al的相关处理

利用式(8), 可以求得 $\sum_e = 25.53\text{eV}/10^{15}\text{atom}\cdot\text{cm}^2$, 由 $N = \frac{\rho}{M} N_A$ 得 $N = 6.02 \times 10^{22}/\text{cm}^2$, 再利用式(2)可得 $(\frac{dE}{dx})_{ave} = 153.69\text{KeV}/\mu\text{m}$ 。

利用之前的校准曲线可得 α 通过1-7层铝的能量依次为5166.53, 4835.75, 4488.17, 4119.56, 3724.91, 3294.63, 2825.76(KeV)。利用式(6)求得铝箔厚度依次为2.076049815, 4.228337451, 6.489892148, 8.888298191, 11.45613357, 14.25576018, 17.3064989。以铝箔层数为横坐标, 厚度为纵坐标, 线性拟合结果如下图所示, 可知铝箔单片厚度为 $2.5\mu\text{m}$ 。



3.2 Mylar的相关处理

取Mylar为 $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_1$, 仿照铝的过程, 利用式(8)分别计算

$$\sum_C = 14.49\text{eV}/10^{15}\text{atom}\cdot\text{cm}^2$$

$$\sum_H = 3.22\text{eV}/10^{15}\text{atom}\cdot\text{cm}^2$$

$$\sum_O = 17.81\text{eV}/10^{15}\text{atom}\cdot\text{cm}^2$$

取

$$N(C) = 1.136 \times 10^{23}\text{atom}\cdot\text{cm}^{-3}$$

$$N(H) = 5.376 \times 10^{19}\text{atom}\cdot\text{cm}^{-3}$$

$$N(O) = 5.367 \times 10^{19}\text{atom}\cdot\text{cm}^{-3}$$

进而求得

$$(\frac{dE}{dx})_C = 164.606\text{KeV}/\mu\text{m}$$

$$(\frac{dE}{dx})_H = 0.017\text{KeV}/\mu\text{m}$$

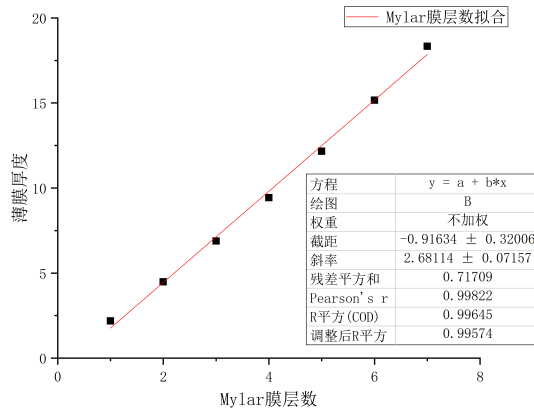
$$(\frac{dE}{dx})_O = 0.096\text{KeV}/\mu\text{m}$$

利用(9), 可以求得

$$(\frac{dE}{dx})_{ave} = 129.96\text{KeV}/\mu\text{m}$$

仿照铝的过程, 可得 α 通过1-7层Mylar薄膜的能量依次为5196.7, 4898.04, 4585.36, 4254.78, 3900.04, 3510.96, 3097.74(KeV)。利用式(6)求得Mylar膜厚度依次为2.186903663, 4.484995383,

6.890966451, 9.434672207, 12.16428132, 15.15812558, 18.3377193。以Mylar膜层数为横坐标, 厚度为纵坐标, 线性拟合结果如下图所示, 可知Mylar膜单片厚度为 $2.7\mu\text{m}$ 。



4 结论与讨论

α 粒子和其他粒子碰撞时, 有可能向各个方向散射, 能量的变化幅度就增大。穿过更厚的薄片, 发生碰撞的次数增加, 能量的变化幅度变得更大。所以 α 粒子穿过吸收体后能谱展宽, 且穿过的吸收体更厚, 展得越宽。

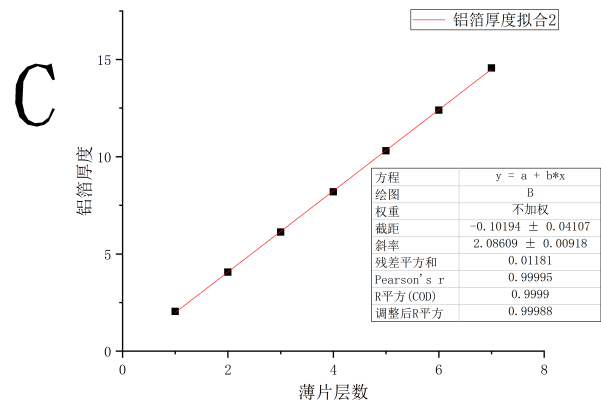
注意到, $\Delta E = -(\frac{dE}{dx})_{ave} \Delta X' = S \frac{\Delta X}{\cos \theta}$ 。当入射角与表面法线交角为 4° 时, $\Delta E = S \frac{\Delta X}{\cos(\frac{\pi}{45})} \approx 1.0024 S \Delta X$; 当入射角与表面法线交角为 6° 时, $\Delta E = S \frac{\Delta X}{\cos(\frac{\pi}{30})} \approx 1.0055 S \Delta X$ 。

仿照铝的处理, 利用金的密度 $\rho = 19.31\text{g}/\text{cm}^3$ 和阻止本领 $(\frac{dE}{dx})_{ave} = 0.228\text{KeV}/(\mu\text{g} \cdot$

$\text{cm}^{-2})$ 可得 $(\frac{dE}{dx})_{ave} = 440.27\text{KeV}/\mu\text{m}$ 。结合式(5)知 $\Delta X = 4.4\text{KeV}$, 取 ^{241}Am 能量为 5485.6KeV , 到灵敏区为 5481.2KeV 。

在3.2节, 我们已经处理了这个题目, Mylar膜单片厚度为 $2.7\mu\text{m}$ 。

在3.1节, 我们有 $N = 6.02 \times 10^{22}/\text{cm}^2$ 。取穿过0-7片铝箔能量近似为5480, 5170, 4840, 4490, 4120, 3720, 3300, 2830(KeV)。由式分0- $i(i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\})$ 片薄膜取7个间隔分别算得 $\Delta X = 2.0428, 4.0674, 6.1231, 8.1928, 10.3097, 12.3964, 14.5648$ 。以铝箔层数为横坐标, 厚度为纵坐标, 线性拟合结果如下图所示, 可知铝箔单片厚度为 $2.1\mu\text{m}$ 。



由此可见, 我们之前求的铝箔单片厚度偏大。如果不全部使 E_0 作为 \sum_e 基能量会更贴近一些, 应该和计算出1片铝箔相当, 即 $2.076\mu\text{m}$ 左右。但对我们的实验设施, 这个精度已经够了。