

# 半导体探测器与 $\alpha$ 粒子能损实验

## ( $\alpha$ 粒子的能量损失)

### 一. 实验目的

1. 了解  $\alpha$  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。

### 二. 实验原理

1. 天然放射性物质放出的  $\alpha$  粒子, 能量范围是 3—8MeV。在这个能区内, 可以忽略。

2.  $\alpha$  粒子与物质的相互作用主要是与核外电子的相互作用

3.  $\alpha$  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  $4Em_0/m$ 。

4.  $\alpha$  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,  $\alpha$  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  $-dE/dx$ , 称为线性阻止本领  $S$ ; 有  $S = -\frac{dE}{dx}$ 。而阻止截面  $\sum_e = \frac{1}{N}S$

当速度远小于光速, 即:  $v \ll c$  时, 我们有:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi Z^2 e^4 NZ}{m_0 v^2} \ln \frac{2m_0 v^2}{I}$$

上式中  $\ln$  项随能量缓慢变化, 因此有  $-\frac{dE}{dx} \propto -\frac{C}{E}$ ,  $C$  为一常数

当粒子穿过厚度为  $\Delta X$  的薄吸收体后, 能量变化可以写成:

$$\Delta E = -\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{平均}} \Delta X$$

进一步可得:

$$\Delta X = \frac{\Delta E}{-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{平均}}} \approx \frac{\Delta E}{(-dE/dx)_{E_1}}$$

当能量损失较大时, 表达式应该为:

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

把  $S$  看做常量,  $\delta E$  去 10Kev, 我们利用拟合知识可得:

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

对于化合物组成的薄箔，可将化合物各组成份的阻止本领相加得到：

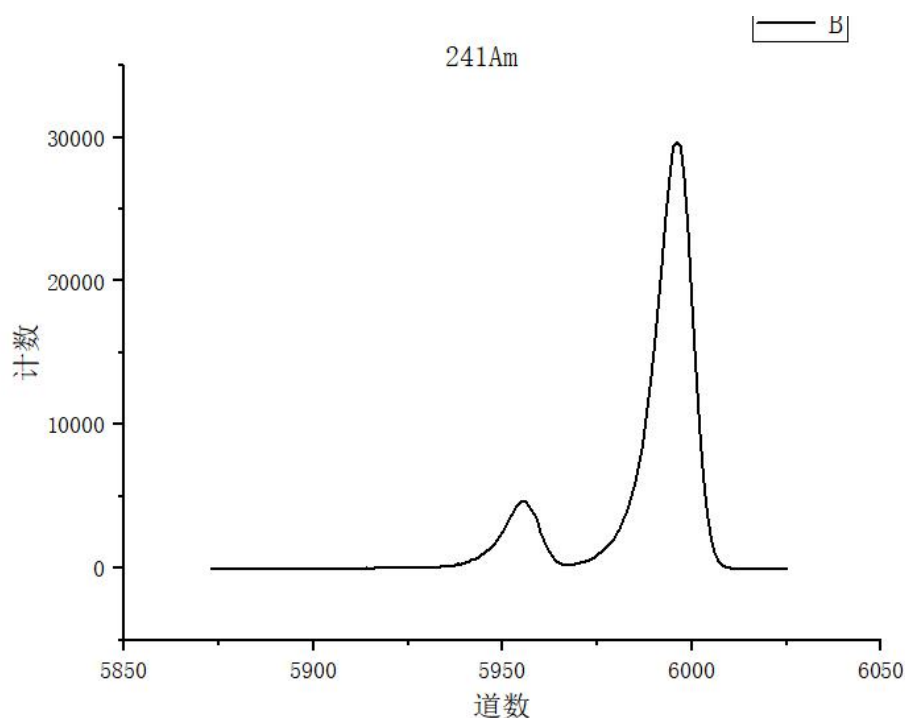
$$\left( \frac{dE}{dx} \right)_e = \frac{1}{A_e} \sum Y_i A_i \left( \frac{dE}{dx} \right)_i (KeV / \mu g \cdot cm^{-2})$$

### 三. 实验内容

1. 测量  $^{241}\text{Am}$  及  $^{239}\text{Pu}$  的 $\alpha$ 粒子的能谱，做能量刻度。
2. 测量  $^{241}\text{Am}$  的 $\alpha$ 粒子通过铝箔及 Mylar 薄箔后的能谱。
3. 从所测各条能谱，确定峰位、半宽度、及  $\alpha$  粒子通过待测样品后的能量损失，计算阻止本领  $\left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{平均}}$  及薄箔的厚度  $(\mu g / cm^2)$ 。

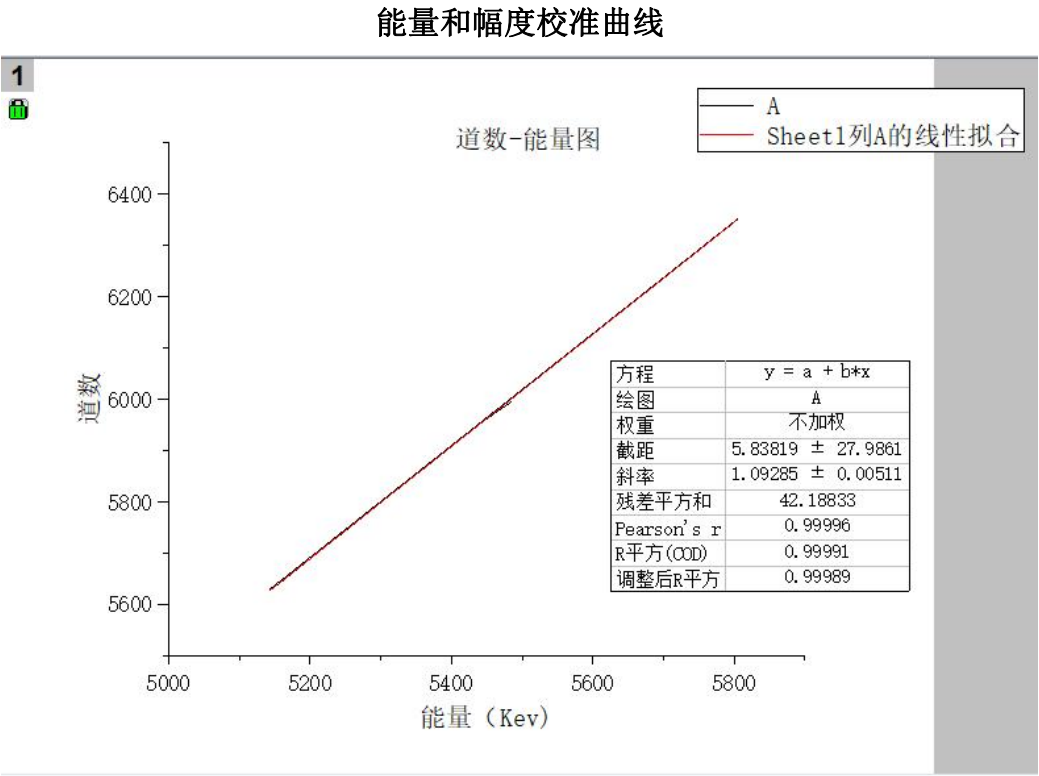
### 四. 实验结果分析及数据处理

1. 将测量的  $^{241}\text{Am}$   $\alpha$  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，算出能量分辨率。



则能量分辨率为： $10.69/5443.54=0.1962\%$

2. 以放射源  $^{241}\text{Am}$ 、 $^{239}\text{Pu}$  等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能量和幅度校准曲线。



由图我们发现校准曲线斜率接近与 1，可见在实验允许了，刻度做的已经足够了

3. 计算铝箔对于放射源 $\alpha$ 粒子的阻止能力 $(\frac{dE}{dx})_{\text{平均}}$ 及薄箔的厚度，并以铝箔层数为横坐标，厚度为纵坐标，进行线性拟合，计算铝箔的单片厚度。  
**【注：为方便理解计算，本虚拟实验中，每种薄膜的单片厚度严格相等，在实际工作中单片厚度必然有所偏差。】**

由：

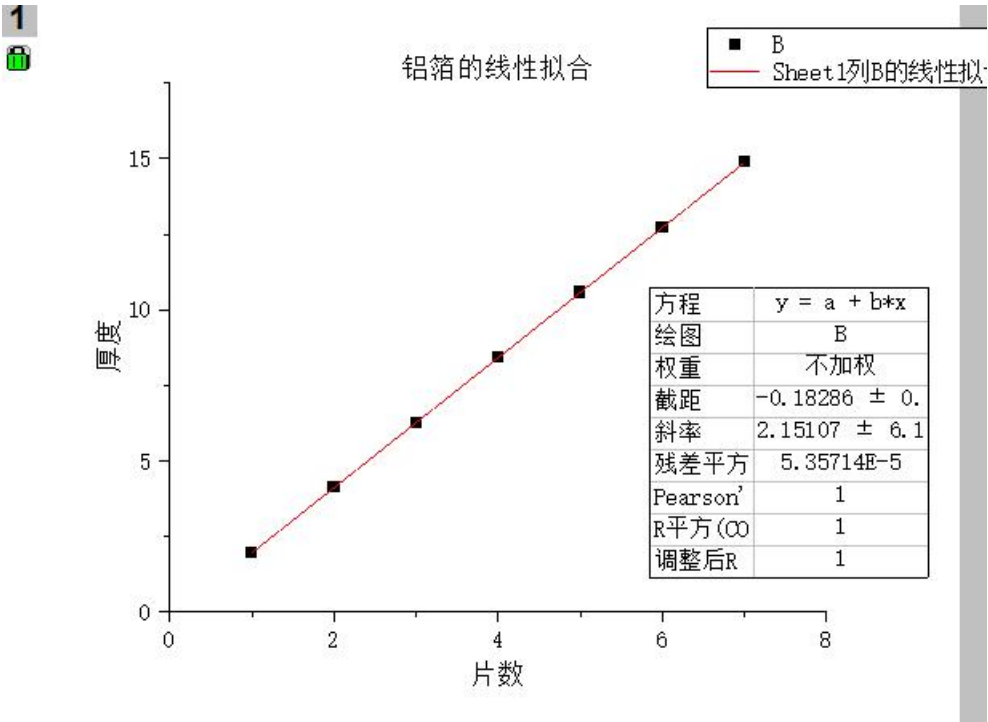
$$\Delta X = \frac{\Delta E}{-(\frac{dE}{dx})_{\text{平均}}} \approx \frac{\Delta E}{(-dE/dx)_{E1}}$$

$$\sum_c = \frac{A_1 E^{A_2} (\frac{A_3}{E/1000} \ln[1 + \frac{A_4}{E/1000} + \frac{A_5 E}{1000}])}{A_1 E^{A_2} + \frac{A_3}{E/1000} \ln[1 + \frac{A_4}{E/1000} + \frac{A_5 E}{1000}]}$$

我们先不考虑 S 的变化；我们可计算得只有一片时，厚度为 1.97um

我们利用校准曲线可得，当片数为 2 片、3 片、4 片、5 片、6 片、7 片时厚度依次为：4.12um、6.27um、8.42um、10.57 um、12.72 um、14.88um.

拟合可得：



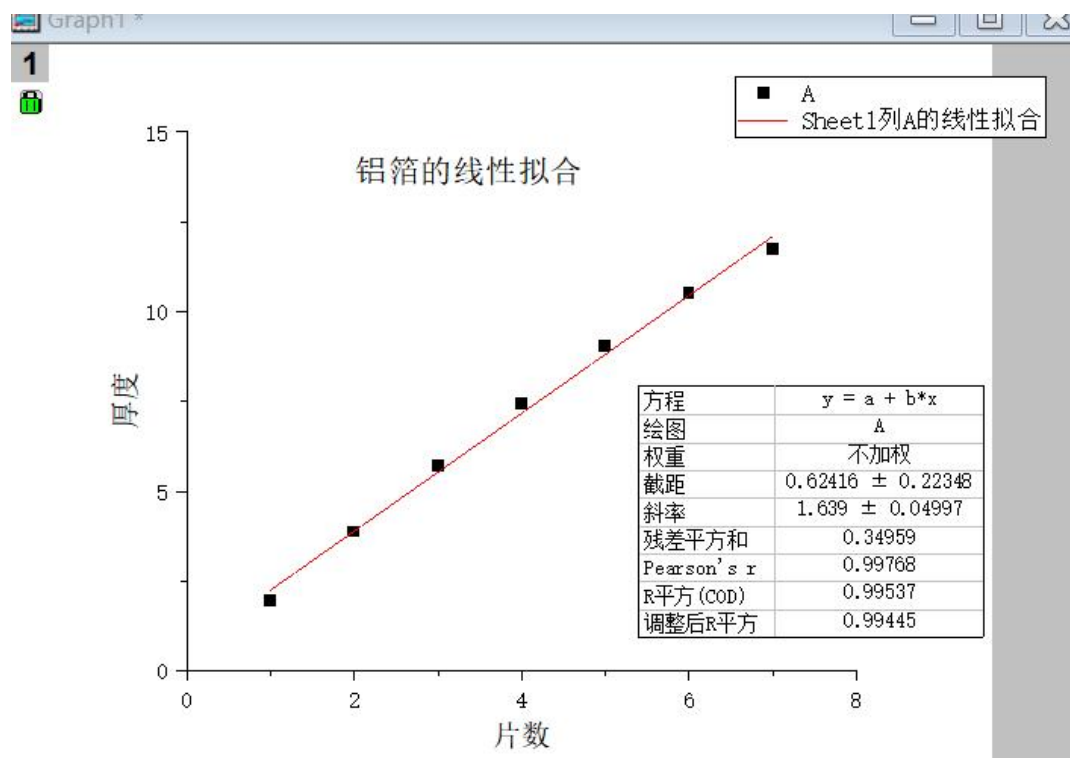
则我们可得厚度为 2.15um。

下面考虑 s 的变化，我们从新求铝箔厚度。

能量	片数	$(\frac{dE}{dx})_{\text{平均}}$	$\Delta E$	$\Delta X$
5166.34	1	159.68	314.55	1.97
4835.26	2	166.42	645.63	3.88
4487.26	3	174.22	993.63	5.70
4118.2	4	183.42	1362.69	7.43
3723.21	5	194.50	1757.68	9.04
3293.78	6	208.31	2187.11	10.50
2829.6	7	225.78	2651.29	11.74

上述中，能量单位为 KeV， $(\frac{dE}{dx})_{\text{平均}}$  为  $\text{eV}/10^{15} \text{atom.cm}^2$ 。

进行拟合可得：



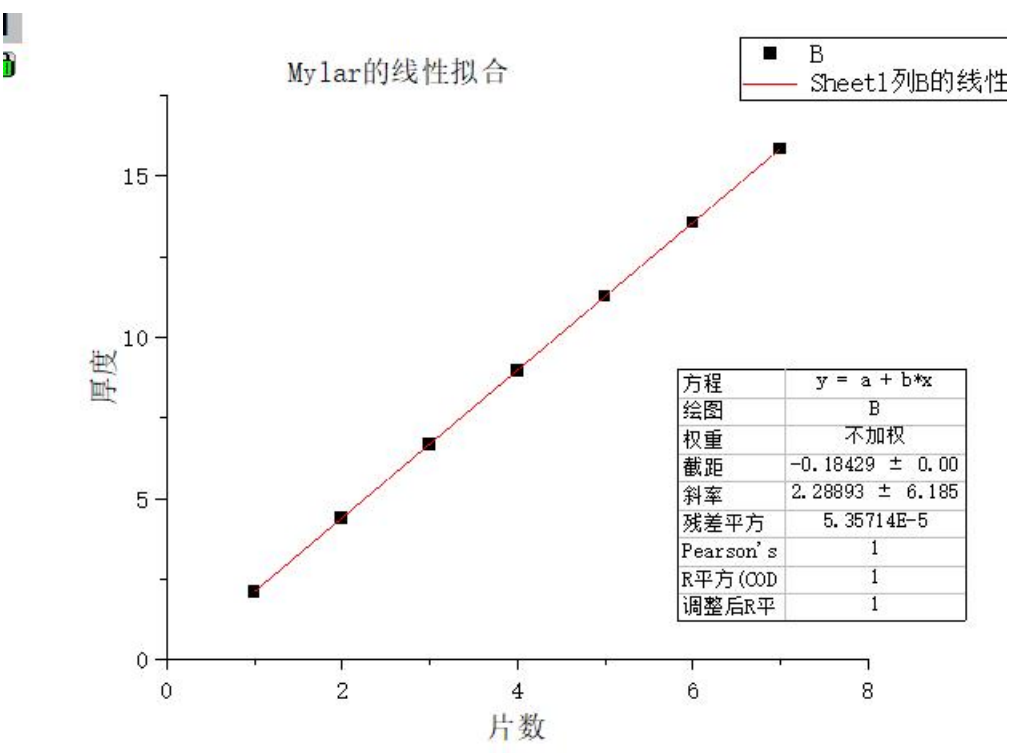
则此时单片铝箔厚度为 **1.64um**.

4. 以同样方法计算 Mylar 薄箔的单片厚度。Mylar 为  $C_{10}H_8O$ , 下面计算 Mylar 的厚度

我们先不考虑 S 的变化，利用校准曲线求其厚度，可得当片数从 0-7 时，厚度依次为：

片数	1	2	3	4	5	6	7
厚度/um	2.11	4.39	6.68	8.97	11.26	13.55	15.84

进行拟合



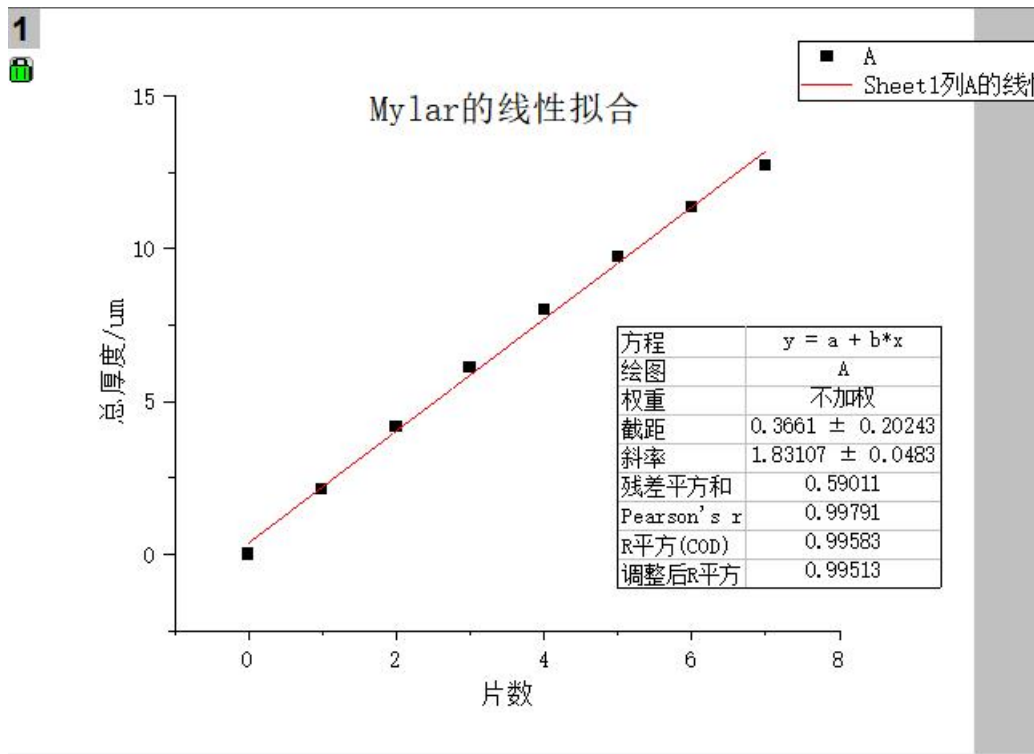
则单片厚度为 2.28um

下面我们考虑 s 的变化，重新求其厚度

下表为不同能量不同能量损失中的总厚度

能量	Mylar膜 片数	$(\frac{dE}{dx})_c$	$(\frac{dE}{dx})_H$	$(\frac{dE}{dx})_O$	$(\frac{dE}{dx})_{平均}$	$\Delta E$	$\Delta X$
5480.89	0	164.71	0.0173	0.0956	130.05	0	0.00
5196.43	1	170.67	0.0178	0.0998	134.75	284.46	2.11
4897.16	2	177.49	0.0186	0.1027	140.14	583.73	4.17
4585.05	3	185.31	0.0193	0.107	146.31	895.84	6.12
4253.54	4	194.58	0.0202	0.1122	153.63	1227.35	7.99
3898.27	5	205.80	0.0213	0.1849	162.50	1582.62	9.74
3506.71	6	220.10	0.0227	0.1265	173.78	1974.18	11.36
3091.39	7	238.10	0.0246	0.1366	187.99	2389.50	12.71

## 进行拟合



由拟合的数据可知 Mylar 厚度为 1.83um.

## 五. 思考题

1. 试定性讨论  $\alpha$  粒子穿过吸收体后，能谱展宽的原因。

答：粒子穿过吸收体后，由于箔片的阻挡作用， $\alpha$  粒子具有能量损失，且片数越多，能量损失越大。所以，当片数较多时，能谱也比较宽。

2. 设组织本领为  $S$ ，薄箔厚度为  $\Delta X$ ，试计算  $\alpha$  粒子倾斜入射，与表面法线交角为  $4^\circ$ 、 $6^\circ$  时能量损失为多少？

答：当倾斜入射时，我们只需要除以一个相应角度的正弦或者余弦值就好，我们有  $\Delta E = (-\Delta X \frac{dE}{dx}) / \cos \theta = -\Delta X S / \cos \theta$ ，当角度为  $4^\circ$  时，能量损失为

$\Delta E = 1.0024 \Delta X S$ ，当角度为  $6^\circ$  时， $\Delta E = 1.0056 \Delta X S$ 。

3. 探测器金层厚 100Å, 试计算  $^{241}\text{Am}$  的  $\alpha$  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  $dE/dx = 0.228 \text{ KeV} / \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

答: 我们有  $\Delta E = -\Delta X \left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{平均}}$ , 则带入计算有:  $\Delta E = 4.39 \text{ KeV}$ , 取开始能量为  $5480.89 \text{ KeV}$ , 则灵敏区能量为:  $5476.5 \text{ KeV}$ 。

4. 从所测到的 Mylar 膜 ( $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_1$ ) 的能量损失, 试计算其厚度。已知碳、氢、氧的原子密度分别:  $N(\text{C}) = 1.136 \times 10^{23} \text{ atm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $N(\text{H}) = 5.376 \times 10^{19} \text{ atm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $N(\text{O}) = 5.367 \times 10^{19} \text{ atm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。质量密度为  $\rho_c = 2.267 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $\rho_H = 8.998 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $\rho_o = 0.001428 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

答: 前面已经处理过该问题。

5. 从所测到的铝箔的能损, 若考虑  $S$  的变化, 试用 (6) 式计算厚度。

答: 在之前的处理中, 我们已经由数据拟合对于不同的能量分别求出了厚度从前面两种方法的计算中, 我们发现考虑  $S$  变化时, 单片铝箔厚度拟合为  $1.64 \mu\text{m}$ 。而由校准曲线得到的厚度为  $2.15 \mu\text{m}$ , 在实验误差允许范围内, 已经足够精确