

文章编号: 1007- 4627(2000)02-0072-05

# 碳离子在铝中的能量歧离和表面粗糙度\*

卢希庭, 翟勇军, 夏宗璜, 郑 涛, 沈定予, 王雪梅, 赵 强, 赵子强

(北京大学技术物理系和重离子物理研究所, 北京 100871)

摘 要: 用金标记卢瑟福背散射法测量了 2.0~ 5.4 MeV 的  $^{12}\text{C}$  离子在蒸镀在 K4 玻璃衬底上的 Al 膜中的能量歧离. 由实验得出了零表面粗糙度的能量歧离. 本结果与 Bohr 理论和已发表的实验工作进行了比较.

关键词: 能量歧离;  $^{12}\text{C}$  在 Al 中; 金标记卢瑟福背散射法; 零表面粗糙度

中图分类号: O571.33 文献标识码: A

## 1 引言

一定能量的带电粒子束在介质中穿过一定厚度后的能量损失将不是确定值. 由于碰撞过程的统计涨落, 此能量损失围绕其平均值有一分布, 此分布函数的标准偏差称之为能量歧离. 能量歧离在离子束分析方法中是一个重要参量, 它的大小严重影响卢瑟福背散射分析、弹性反冲分析和核反应分析等方法的深度分辨; 另外在离子注入、气体室窗膜设计、吸收片法鉴别粒子和降低束流能量的实验中, 它也是一个不可忽略的参量. 在一般应用中, 通常都用早期的 Bohr 理论<sup>[1]</sup>来计算能量歧离的大小, 这对定性分析尚属可行, 但对定量分析将产生严重问题. 实验表明, 能量歧离的实验值可比 Bohr 理论值高出 50% 以上. 后来的能量歧离理论虽有一些发展, 但没有明显改进与实验的符合程度, 因此开展能量歧离的实验研究是非常必要的. 遗憾的是, 迄今这方面的研究相对还较少, 尤其是重离子的能量歧离研究就更少, 已有的实验数据彼此分歧也较大. 究其原因, 样品表面的粗糙度对能量歧离的测量结果会产生严重影响. 这方面已开展了一些定性研究<sup>[2]</sup>, 但未见有定量研究的报道. 本文定量研究了样品表面粗糙度对碳离子在铝中的能量歧离的影响, 并给出了零粗糙度时的能量歧离.

## 2 方法原理

为了便于制备表面粗糙度不同的系列样品, 本

工作采用了卢瑟福背散射法(RBS)测量能量歧离, 其基本原理见图1.

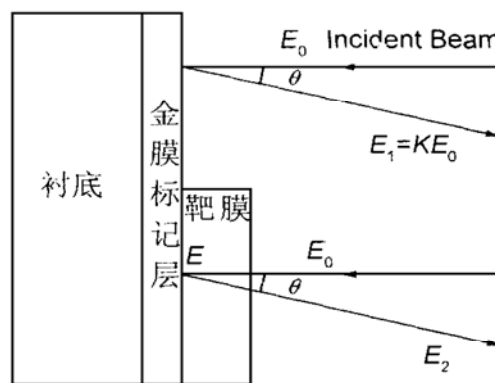


图1 能量歧离测量原理图

在具有一定表面粗糙度的 K4 玻璃衬底上蒸镀上一层很薄的金标记层(约 5 nm), 然后挡住样品表面的一半, 在另一半金层上再蒸镀上被测样品铝膜. 将由加速器产生的一定能量  $E_0$  的离子分别入射在样品的金膜和铝膜上, 在  $\theta$  角方向将分别探测到以峰值能量为  $E_1$  (无铝膜覆盖) 和  $E_2$  (有铝膜覆盖) 的金标记层的背散射峰. 当金标记层很薄时, 所得的背散射峰接近高斯分布. 由于能量歧离的存在, 经过铝膜后在金标记层上的背散射峰的半高宽比直接在金标记层上的背散射峰的半高宽要大. 直接在金标记层上的背散射峰的半高宽是由实验系统的分辨率和金层厚度引起的, 而经过铝膜后在金标记层上的背散射峰的半高宽是由实验系统的分辨率、金

\* 收稿日期: 1999 - 11 - 05

\* 基金项目: 核工业科学基金资助项目(H7196AY0008)

作者简介: 卢希庭 (1931- ), 男 (汉族), 浙江东阳人, 教授, 从事原子核物理学研究.

层和铝膜造成的能量歧离共同引起的. 比较两种背散射峰的半高宽并经过数据处理就可以得到铝膜造成的能量歧离值.

设  $\Omega$  为  $E_1$  峰的标准偏差, 它只受实验系统分辨率和金层的影响,  $\Omega$  为  $E_2$  峰的标准偏差, 它受系统分辨率、金层和离子经过铝膜时的能量歧离的共同影响, 则离子经过铝膜时的能量歧离  $\Omega$  为

$$\Omega = (\Omega^2 - \Omega^2)^{1/2} = \frac{1}{2.355}(\Delta_2^2 - \Delta_1^2)^{1/2}, \quad (1)$$

其中  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  分别为  $E_1$  峰和  $E_2$  峰的半高宽.

上述讨论没有提及样品表面的粗糙度问题, 实际上, 任何样品的表面都存在一定粗糙度. 实验表明, 样品表面的粗糙度对实验测得的能量歧离有重要影响. 在束流斑点范围内的样品表面, 由于粗糙度的存在, 束流经过样品的有效距离不是单一值, 而是围绕样品厚度的平均值有一涨落分布, 这种涨落分布的标准偏差称之为粗糙度. 粗糙度的存在将使束流穿过样品后的能量损失涨落分布加宽, 即增加了能量歧离. 这样, 对于同一种离子-靶系统, 不

同实验室测得的能量歧离, 由于样品表面粗糙度的不同就可能差别很大. 为了将实验结果和理论计算进行比较, 就应该使用零粗糙度时的实验值或者粗糙度引起的能量歧离可以忽略时的实验值. 本工作制备了 4 种不同粗糙度的样品, 分别测量它们的能量歧离, 作能量歧离和粗糙度的关系图, 通过外推即可求得零粗糙度时的能量歧离.

### 3 实验细节

制备具有不同表面粗糙度的样品是开展本工作的前提. 实验表明, 被测样品层的表面粗糙度主要取决于衬底表面的粗糙度. 经过多次反复实验, 最后决定采用精细研磨法来制备具有不同表面粗糙度的 K4 型玻璃作为衬底, 用表面轮廓仪测量表面粗糙度, 先后测量了 K4 玻璃、金层和铝层表面的粗糙度, 结果如表 1 所示. 表中铝层总粗糙度是考虑到铝层的两个表面粗糙度(其中之一即金层表面粗糙度)按独立无关假设计算的. 由表 1 可见, 铝层表面的粗糙度主要取决于 K4 玻璃表面的粗糙度.

表 1 样品表面粗糙度(单位: nm)

样品编号	K4表面	金层表面	铝层表面	铝层总粗糙度 $R_{Al}$	样品有效粗糙度 $R_{eff}$
A	2.7	2.5	2.8	3.8	6.4
B	75	76	75	107	180
C	170	175	180	251	424
D	246	285	236	370	625

能量歧离的测量是在北京大学技术物理系的  $2 \times 1.7$  MV 串列加速器上进行的. 由加速器产生的  $^{12}\text{C}$  离子束, 经  $45^\circ$  偏转磁铁及相距为 2 m 远的两个准直光栏后, 注入真空度约为  $10^{-5}$  Pa 的散射靶室, 垂直入射到样品上, 束流在靶上的斑点大小约为  $1 \times 1.5$  mm<sup>2</sup>. 入射离子能量范围为 2.58~6.43 MeV. 在与样品表面法线成  $\theta$  ( $20^\circ$ ) 角的方向, 距靶点 7.5 cm 处, 放一金硅面垒型半导体探测器, 用来探测背散射的  $^{12}\text{C}$  离子. 探测器前垂直放置一个  $2 \times 4$  mm<sup>2</sup> 的矩形光栏, 用以提高探测系统的角分辨. 对于能量为 5.5 MeV 的  $\alpha$  粒子, 探测器的能量分辨为 12.1 keV. 探测系统的能量刻度是用经过能量刻度的加速器给出的碳离子散射束进行的. 实验表明, 该探测系统对  $^{12}\text{C}$  离子的能量线性响应良好. 用

碳离子的背散射法测得的铝膜厚度为 234 nm.

### 4 实验结果

对 4 块具有不同表面粗糙度的铝样品, 各测量了 7 种能量的  $^{12}\text{C}$  离子经过样品后的能量歧离, 其结果如图 2 所示. 其中  $E$  为平均能量, 采用平均能量近似法, 它与  $E_1$  和  $E_2$  的关系可近似表示为

$$E = \frac{(E_1 \cos \theta + E_2)}{(1 + K \cos \theta)}, \quad (2)$$

式中  $K$  为运动学因子.  $\Omega$  的误差约为 10%, 主要由背散射能谱的拟合精度决定. 由图 2 可见, 在本工作能量范围, 能量歧离随能量变化的大致趋势是: 开始随能量增加而增加, 而后达到或接近一最大值.

从该数据可进一步得到7种能量下的能量歧离随样品粗糙度的变化,如图3所示.其中样品粗糙度为有效粗糙度  $R_{\text{eff}}$ ,从后面的讨论(见(10)式)可知,它与铝膜的粗糙度  $R_{\text{Al}}$ 近似地有以下关系:

$$R_{\text{eff}} = R_{\text{Al}} \left( K^2 + \frac{1}{\cos\theta} \right), \quad (3)$$

其值已列于表1.由图3可见,  $\Omega$  随  $R_{\text{eff}}$  的变化近似地呈线性关系,拟合结果如下:

- $E_1 \quad \Omega = 9.6 + 0.049 1R_{\text{eff}}$
- $E_2 \quad \Omega = 14.0 + 0.049 4R_{\text{eff}}$
- $E_3 \quad \Omega = 20.9 + 0.041 3R_{\text{eff}}$
- $E_4 \quad \Omega = 22.6 + 0.051 5R_{\text{eff}}$
- $E_5 \quad \Omega = 26.0 + 0.041 0R_{\text{eff}}$
- $E_6 \quad \Omega = 24.0 + 0.050 7R_{\text{eff}}$
- $E_7 \quad \Omega = 27.1 + 0.043 1R_{\text{eff}}$

从而得到零粗糙度时7个能量点的能量歧离值.结果如图4所示.

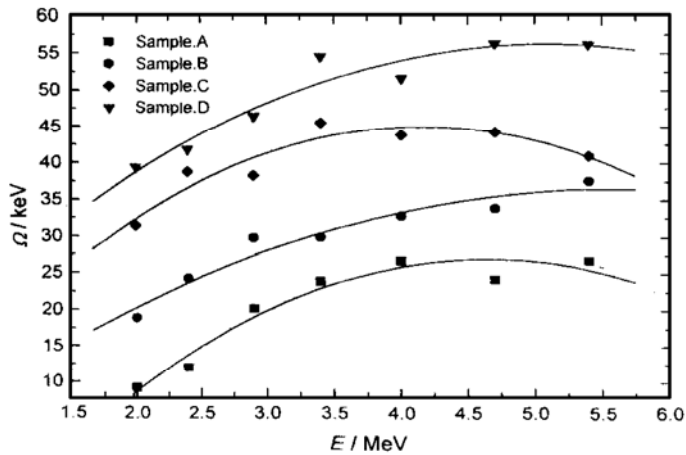


图2 不同表面粗糙度下碳离子能量歧离与能量的关系

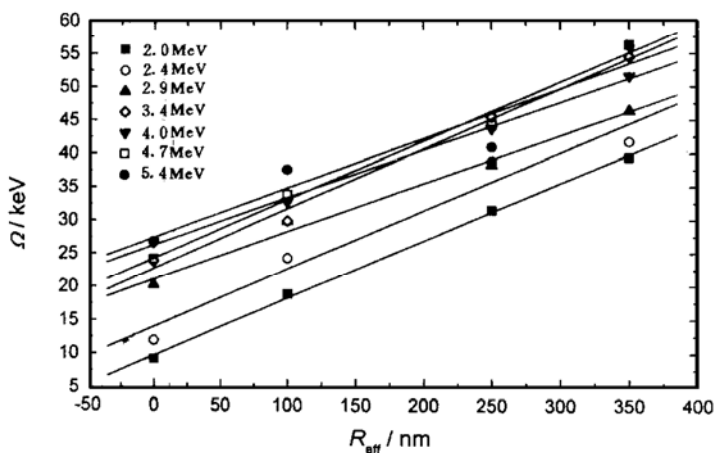


图3 不同碳离子能量下的能量歧离与表面粗糙度的关系

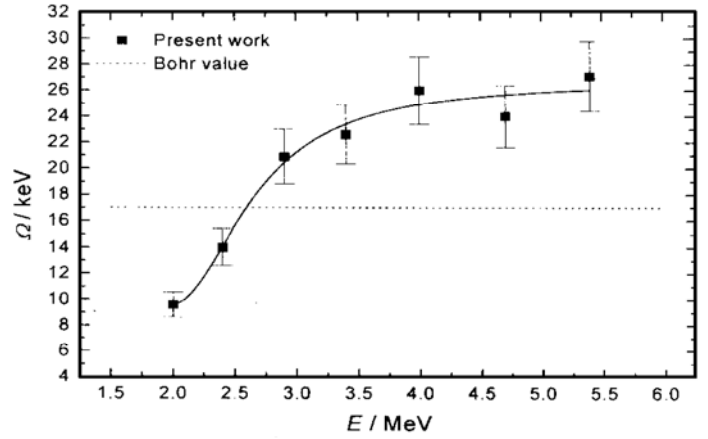


图4 零粗糙度时碳离子能量歧离与能量的关系

## 5 讨论

### 5.1 与 Bohr 理论的比较

在实际应用中,常用能量歧离的 Bohr 理论估算能量歧离的大小.其值由下式给出:

$$\Omega_b = (4\pi Z_1^2 e^4 Z_2 N t)^{1/2}, \quad (4)$$

式中  $Z_1$  和  $Z_2$  分别是入射离子和靶样品的原子序数,  $N$  和  $t$  分别是靶样品的原子密度和厚度.由(4)式可见,对确定的入射离子和靶系统,能量歧离的 Bohr 理论值随靶厚度的平方根而增加,而与入射离子的能量无关.对于背散射碰撞,总能量歧离  $\Omega$  与入射路程的能量歧离  $\Omega_{\text{in}}$  和出射路程的能量歧离  $\Omega_{\text{out}}$  之间有下列关系<sup>[3]</sup>:

$$\Omega^2 = K^2 \Omega_{\text{in}}^2 + \Omega_{\text{out}}^2, \quad (5)$$

其中  $K$  为运动学因子.对于背散射过程有

$$\Omega_b^2 = 4\pi Z_1^2 e^4 Z_2 N t \left| \frac{K^2}{\cos\theta_1} + \frac{1}{\cos\theta_2} \right|. \quad (6)$$

式中  $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为样品法线与入射束轴线和散射束轴线之间的夹角.

对于本实验,  $\theta_1 = 0$ ,  $\theta_2 = 20^\circ$ , 可以算得  $\Omega_b = 17.0 \text{ keV}$ , 其值也用虚线表示在图4中.由图4可见,在本实验能区的低能部分,实验值低于 Bohr 值;在高能部分,实验值高于 Bohr 值,最高高出50%以上.

实验值与 Bohr 理论值出现分歧是不难理解的.因为能量歧离的 Bohr 理论假设是在静止的自由电

子和完全离化的入射离子之间发生能量转移. 这一假设当能量在  $dE/dx$  曲线的极大值附近或小于此能量时将不再成立. 本实验能量正好落于该能区. 事实上, 通常离子束分析方法中使用的重离子束都在该能区, 因而此时应用 Bohr 理论来计算包含有能量歧离的有关问题将是不可靠的.

## 5.2 与前人实验的比较

据我们所知, 与本工作可以比较的前人实验只有 Cowern 等<sup>[4]</sup>的工作. 他们利用透射法测量了入射能量为 2.7~36 MeV 的  $^{12}\text{C}$  离子穿透  $217 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  铝膜后的能量歧离. 为了合理地将两者进行比较, 需要作以下转换:

(1) 从本结果推出  $^{12}\text{C}$  离子穿透  $217 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  铝膜后的能量歧离. 首先假设能量歧离  $\Omega$  随样品厚度  $t^{1/2}$  而增加, 令  $\Omega$  为透射法测得的能量歧离,  $t_1$  为透射法中使用的样品厚度, 则有

$$\Omega^2 = c_1 t_1, \quad (7)$$

式中  $c_1$  为比例常量. 令  $\Omega$  为背散射法测得的能量歧离,  $t_2$  为透射法中使用的样品厚度, 则有

$$\Omega^2 = k^2 c_2 t_2 + \frac{c_2 t_2}{\cos\theta}, \quad (8)$$

式中  $c_2$  和  $k^2$  为比例常量. 假设能量歧离随能量变化比较缓慢, 则在任一能量点附近, 近似有

$$c_1 = c_2 = k^2. \quad (9)$$

所以在同一能量点用两种方法测得的能量歧离相等时, 由(7)~(9)式可以推得两种方法所用的样品厚度间有下列关系:

$$t_1 = t_2 \left| K^2 + \frac{1}{\cos\theta} \right|. \quad (10)$$

本实验所用的铝膜厚度为  $63.2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  (234 nm), 由(10)式可得等效为透射法的厚度为  $63.2 \times (K^2 + 1/\cos\theta) = 106.6 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ , 由此可得  $^{12}\text{C}$  离子穿透  $217 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  铝膜后的能量歧离  $\Omega'$  为

$$\Omega' = \left| \frac{217}{106.6} \right|^{1/2} \Omega = 1.427\Omega \quad (11)$$

$\Omega'$  值列于表4中,  $\Omega'$  与  $E$  的关系以实心方块表示在图5中.

(2) 因 Cowern 等人的结果中的碳离子能量为入射能量  $E_0$ , 则需把它换成对应的平均能量  $E$ , 即

$$E = E_0 - \frac{1}{2} t \frac{dE}{dx}, \quad (12)$$

式中  $t$  为样品厚度;  $dE/dx$  为阻止本领, 可近似地取  $E_0$  时的  $dE/dx$  值. 转换后的结果以空心圆也表示在图5中. 由图5可见, Cowern 等人的结果与本实验结果在误差范围内基本一致. 应该指出, Cowern 等人的工作也考虑了样品表面粗糙度问题, 因而是比较可信的.

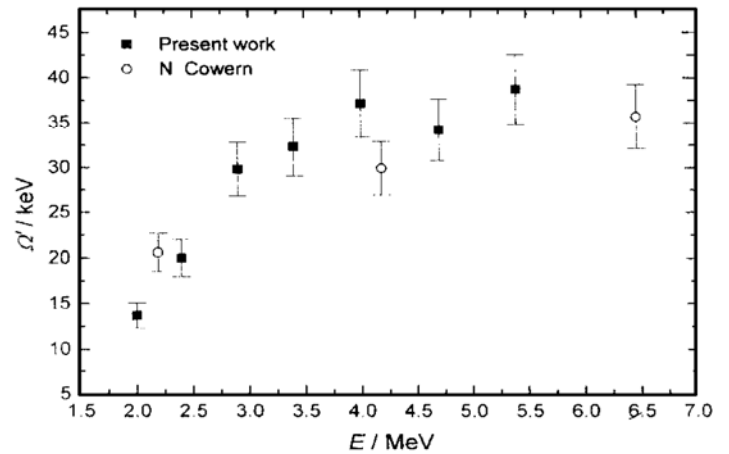


图5 碳离子穿透  $217 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  铝膜后的能量歧离与能量的关系

## 6 结论

利用具有不同表面粗糙度的样品, 用背散射法测量了低能碳离子穿过铝膜时的能量歧离, 并导出了零粗糙度时的能量歧离. 从本文结果可以得出3点结论: (1) 本工作提出了一种可行的求零粗糙度的能量歧离的实验方法; (2) Bohr 理论不适宜于描述低能重离子在薄膜样品中的能量歧离, 通常在重离子分析方法中使用 Bohr 理论会产生严重问题; (3) 样品表面粗糙度对能量歧离有重大影响, 在离子束分析、离子注入和某些核物理实验中必须考虑表面粗糙度的影响, 否则会导致虚假结果.

致谢 衷心感谢彭郁卿和王至光对本工作的帮助.

## 参 考 文 献:

- [1] 朱唯干等著. 邹世昌, 林成鲁译. 背散射分析技术 [M]. 北京: 原子能出版社, 1986, 51~ 58.
- [2] Sofield C J, Cowern N E B, Freeman J M *et al.* Energy Straggling of 5.486 MeV Alpha Particles in Al [J]. Phys Rev, 1977, A15: 2 221~ 2 226.
- [3] Harris J M, Nicolet M-A. Energy Straggling of  $^4\text{He}$  Ions below 2.0 MeV in Al, Ni, and Au [J]. Phys Rev, 1975, B11: 1 012~ 1 019.
- [4] Cowern N E B, Sofield C J, Freeman J M *et al.* Energy Straggling of 3~ 36 MeV  $^{12}\text{C}$  Ions in Aluminum [J]. Phys Rev, 1979, A19: 111~ 115.

## Energy Straggling of Carbon Ions in Aluminum and Surface Roughness\*

LU Xi-ting, ZHAI Yong-jun, XIA Zong-huang, ZHENG Tao, SHEN Ding-yu  
WANG Xue-mei, ZHAO Qiang, ZHAO Zi-qiang  
(*Department of Technical Physics and Institute of Heavy Ion  
Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

**Abstract:** The energy straggling of 2.0~ 5.4 MeV carbon ions in aluminum films evaporated onto K4 glass substrates was measured with the Au marked RBS method. The surface roughness with zero was obtained from experiment. It supplied a method for determination of the surface roughness with zero. The present result was compared with the Bohr theory and the results of published experimental work. It is shown that the Bohr theory is not appropriate to description of the energy straggling of low energy heavy-ion in films, and the surface roughness could seriously affect the energy straggling. We have to pay more attention to both points mentioned above in the ion beam analyses, ion implantations and some nuclear physics experiments.

**Key words:** energy straggling; Au marked RBS method; surface roughness with zero

---

\* **Foundation item:** Science Foundation of Chinese Nuclear Industry (H7196AY0008)