

文章编号: 1007-4627(2002)02-0231-03

## 团簇离子在固体中能损的非线性效应\*

杨朝文, 缪竞威, 杨百方, 师勉恭, 刘晓东

(四川大学辐射物理及技术教育部重点实验室, 四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610064)

**摘 要:** 研究了每核子能量为 260—450 keV 的  $H_2^+$ ,  $H_3^+$ ,  $H_4^+$ ,  $H_5^+$  和  $H_n^+$  团簇离子在金膜中的能损. 发现团簇离子中平均每个质子的能损大于相同速度的单质子能损, 即能损比大于 1, 且随团簇离子的大小和速度的增加而增加.

**关键词:** 团簇; 能损; 非线性效应

**中图分类号:** O562 **文献标识码:** A

### 1 引言

对团簇能损的研究最早的报道见于文献[1], Brandt 等<sup>[1]</sup>通过实验测量发现, 每核子能量约为 100 keV 的快质子团簇  $H_2^+$ ,  $H_3^+$  在碳膜和金膜中能损与具有相同速度的组成团簇的质子的能损之和不同. 随后, Steuer 等<sup>[2]</sup>研究了氮和氧双原子团簇  $N_2^+$  和  $O_2^+$  在碳膜中的能量损失, 发现这一能量损失小于具有相同速度的组成团簇的两个单原子离子的能损之和, 即能损比小于 1. 这一结果明显地不同于 Brandt 等人得到的  $H_2^+$  和  $H_3^+$  在相同介质中的能损. 再后来, Ray 等<sup>[3]</sup>比较详细地研究了能量为 10—120 keV/u 的氢团簇  $H_n^+$  ( $n=2, 3-25, \text{odd}$ ) 在碳膜中的能损. 在较低能量时 ( $< 50 \text{ keV/u}$ ), 得到的能损比小于 1, 在较高能量时 ( $> 50 \text{ keV/u}$ ), 能损比大于 1, 而且, 当  $n > 3-5$  时, 能损比不再增加. 1994 年, Baudin 等<sup>[4]</sup>对碳团簇  $C_n$  ( $n < 9$ ) 及  $C_{60}$  在碳膜中的能损进行了研究. 1995 年, Tomaschko 等<sup>[5]</sup>也对能量为 1.4—4.0 MeV 的碳团簇  $C_n$  ( $n < 6$ ) 在碳膜、金膜中的能损进行了研究. 不同于 Baudin 等人的结果, 他们得到,  $C_n$  团簇的能损是具有相同速度的  $C_1$  的能损的  $n$  倍, 也就是说, 不存在能损的增强效应. 1994 年, Susuki 等<sup>[6]</sup>在较高的能量下研究了 9.6 MeV/u 的  $H_2^+$  在 1.5—8.5  $\mu\text{g/cm}^2$  厚的碳膜中的能损. 实验中使用了高分辨磁分析器和位置灵敏正比计数器结合形成的高分辨谱仪, 整个测量过程中控制计数率小于  $10^2 \text{ counts/s}$ , 并监

测磁场强度以作为位置与能量的刻度校正. 在 9.6 MeV/u 能量下, 他们得到的能损比为 1.41. 1996 年, 同样对于  $H_2^+$ , 只不过是在较低能量下, Matsunami 等<sup>[7]</sup>用高分辨能谱仪研究了 100 keV/u 的  $H_2^+$  在 5—18 nm 厚的碳膜中的能损, 得到能损比约为  $0.9 \pm 0.1$ . 1997 年, Ben-Hamu 等<sup>[8]</sup>用飞行时间方法, 测量了 MeV 量级的  $O_2$ ,  $B_3$ ,  $C_3$  和  $C_4$  等团簇在碳膜中的能损及能损比. 对于  $O_2$  和  $B_3$ , 测得的能损比接近为 1, 对于  $C_3$  和  $C_4$ , 测得的能损比略小于 1.

由上可见, 尽管关于团簇能损的实验研究不少, 所用的实验测量方法也各不相同, 但是所得到的结果并不完全一致. 这一方面说明, 实验结果受实验测量方法或探测仪器的影响, 比如, 金(硅)面垒探测器前面的死层要引起粒子在其中额外的能损. 另一方面说明, 团簇能损及其非线性效应本身是一个非常复杂的问题, 还需要不断深入的研究.

有鉴于此, 我们用金(硅)面垒探测器对  $H_n^+$  ( $n \leq 7$ ) 等氢团簇在探测器灵敏区前死层中的能损进行了测量, 得到了一些初步的结果.

### 2 测量原理

在核物理实验中, 经常采用 Au-Si 面垒半导体探测器测量带电粒子的能量. 但是, 由于制作工艺的要求, 在半导体探测器灵敏区前存在一个非灵敏

收稿日期: 2002-03-05; 修改日期: 2002-03-05

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19975034, 19975033, 1017541)

作者简介: 杨朝文(1963—), 男(汉族), 四川西充人, 教授, 从事核物理、原子分子碰撞及交叉学科研究.

层,常称为死层.带电粒子在进入灵敏区前,要在这一死层中损失能量,这就是半导体探测器脉冲高度损失的主要原因之一.我们将利用这一特点,测量具有相同速度的  $H^+$ ,  $H_2^+$ ,  $H_3^+$ ,  $H_5^+$  和  $H_7^+$  等单质子和团簇离子在这一死层中的能量损失.

假设入射粒子的能量为  $E$ ,在探测器死层中的能量损失为  $\Delta E$ ,那么,实际在探测器灵敏区中损失的能量仅为  $E-\Delta E$ ,这部分能量将转化为探测器脉冲幅度信号被多道分析器记录.如果对应的能谱峰位置为  $M$ ,则有:

$$E - \Delta E = kM, \quad (1)$$

(1)式中  $k$  为比例系数,与探测器和测量条件有关.

由于死层厚度较薄,因此可以近似认为,入射粒子在其中的能损为

$$\Delta E = \left(-\frac{dE}{dx}\right)d, \quad (2)$$

$d$  为死层厚度,  $-dE/dx$  为死层介质的阻止本领,可以通过计算或查表得到.

假设能量为  $E_{10}$  和  $E_{20}$  的质子在相同的测量条件下测到的能谱峰位置分别为  $M_{10}$  和  $M_{20}$ ,根据(1)式有:

$$\begin{aligned} E_{10} - \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{E_{10}} d &= kM_{10}, \\ E_{20} - \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{E_{10}} d &= kM_{20}. \end{aligned} \quad (3)$$

由(3)式就可以求出系数  $k$  和死层厚度  $d$ .

设团簇  $H_n^+$  的能量为  $E_n$ ,对应的多道位置为  $M_n$ ,在死层中的能损为  $\Delta E_n$ ,根据(1)式有:

$$\Delta E_n = E_n - kM_n. \quad (4)$$

因此,只要在相同的条件下测量  $H^+$ ,  $H_2^+$ ,  $H_3^+$ ,  $H_5^+$  和  $H_7^+$  等团簇离子的能谱,根据上述讨论,就能获得其在探测器死层中的能量损失.也可以得到相对于相同速度的质子的能损比

$$R_n = \frac{\Delta E_n}{n\Delta E_1}. \quad (5)$$

### 3 实验装置和测量方法

如图 1 所示,高频离子源中产生的  $H_n^+$  离子,由 2.5 MV Van de Graaff 静电加速器加速到一定

能量后,经  $90^\circ$  磁分析器对离子束进行质量分析.改变磁场大小可以选择  $H^+$ ,  $H_2^+$ ,  $H_3^+$ ,  $H_5^+$  和  $H_7^+$  等不同种类的团簇束流<sup>[9]</sup>.  $90^\circ$  磁分析器出口到下一个  $20^\circ$  磁分析器入口距离约 2.5 m,在这段管道中真空度约为  $1.33 \times 10^{-3}$  Pa.  $H_n^+$  与管道中残余气体碰撞后将分解,分解后的产物仍将沿束流方向前进,其能量与其质量成正比,也就是说,  $H_n^+$  及其分解产物具有相同的速度,这为比较不同大小的团簇在相同速度下的能损提供了方便,也避免了加速器提供低能团簇的困难.分解产物经过  $20^\circ$  磁分析器后,不同质量和电荷态的粒子将被分开,用荧光屏可以观察到.调整  $20^\circ$  磁分析器的激励电流,可以让不同质量的分解产物分别通过光阑  $C_3$  后到达探测器  $D_1$ .与此同时,在  $0^\circ$  束流方向安装探测器  $D_2$ ,可用于记录分解产物中的中性粒子如  $H$ ,  $H_2$  和  $H_3$  等,以研究团簇是如何分解的<sup>[10]</sup>.

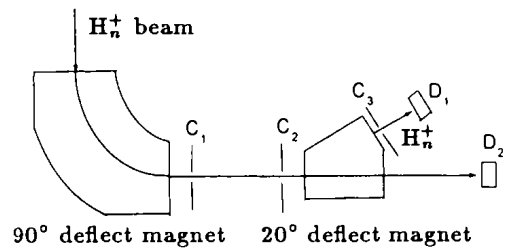


图 1 团簇能损实验装置示意

### 4 实验结果

用高频粒子源产生  $H_n^+$  ( $n \leq 7$ ) 离子,由静电加速器加速到 1.80 MeV,经过  $90^\circ$  分析磁铁对离子束进行质量分析,分别选择  $H_4^+$ ,  $H_5^+$  和  $H_7^+$  离子束流,并测量它们及其分解产物的能谱.根据上述原

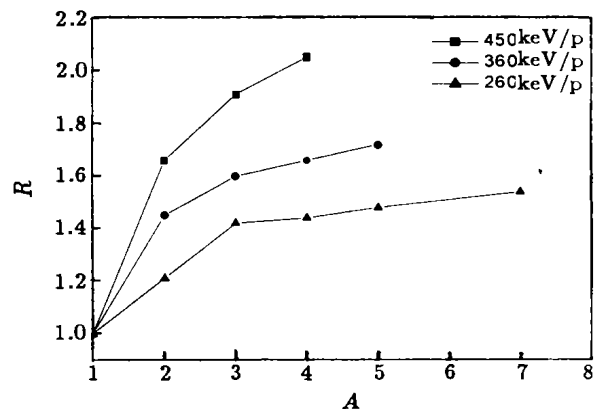


图 2 团簇能损比随团簇大小和速度的变化

理和方法, 得到如图 2 所示的结果。

从结果可以得到如下定性的结论: 对于  $H^+$ , 能量越高能损越小, 与 Bethe-Bloch 能损理论一致;

在团簇大小相同的情况下, 能损比随团簇速度的增加而增加; 在速度相同的情况下, 能损比随团簇大小的增加而增加。

### 参 考 文 献:

- [1] Brandt W, Ratkowski A, Ritchie R H. Energy Loss of Swift Proton Clusters in Solids[J]. Phys Rev Lett, 1974, **33**(22): 1 325.
- [2] Steuer M F, Gemmell D S, Kanter E P, *et al.* Diminished Stopping Power for Fast Nitrogen and Oxygen Diclusters in Carbon[J]. Nucl Instr and Meth, 1982, **194**: 277.
- [3] Ray E, Kirsch R, Mikkelsen H H, *et al.* Slowing down of Hydrogen Clusters in Thin Foils[J]. Nucl Instr and Meth, 1992, **B69**: 133.
- [4] Baudin K, Brunelle A, Chabot M, *et al.* Energy Loss by MeV Carbon Clusters and Fullerene Ions in Solids[J]. Nucl Instr and Meth, 1994, **B94**: 341.
- [5] Tomaschko Ch, Kugler D B R, Schurr M, *et al.* Energy Loss by MeV Carbon Cluster Ions in Matter[J]. Nucl Instr and Meth, 1995, **B103**: 407.
- [6] Susuki Y, Fritz M, Kimura K, *et al.* Stopping Power of Carbon for 9.6 MeV/u  $H_2^+$  Ions[J]. Phys Rev, 1994, **A50**(4): 3 533.
- [7] Matrunami N. Energy Loss Distribution of  $H_2^+$  with  $\sim 100$  keV in Thin Carbon Films[J]. Nucl Instr and Meth, 1996, **B115**: 5 557.
- [8] Ben-Hamu D, Baer A, Feldman H, *et al.* Energy Loss of Fast Clusters through Matter[J]. Phys Rev, 1997, **A56**(6): 4 786.
- [9] 杨朝文, 唐阿友, 刘晓东等. 用于团簇碰撞研究的多路多道谱数据在线获取与处理系统[J]. 原子与分子物理学报, 2001, **18**(2): 126.
- [10] 杨百方, 缪竞威, 师勉恭等.  $H_2^+$  团簇离子的形成和分解反应[J]. 原子与分子物理学报, 1998, 增刊: 254.

## Nonlinear Effect of Energy Loss for Swift Hydrogen Cluster Ions in Solids\*

YANG Chao-wen, MIAO Jing-wei, YANG Bei-fang, SHI Mian-gon, LIU Xiao-dong  
(The Key Laboratory of Radiation Physics and Technology of Ministry of Education, China;  
Institute of Physics Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** The energy losses of cluster ions  $H_2^+$ ,  $H_3^+$ ,  $H_4^+$ ,  $H_5^+$  and  $H_7^+$  with energy of 260—450 keV/p in solid films have been measured. It has been found that the energy loss per proton in clusters is larger than that of single proton with the same velocity as clusters, that is, the energy ratio is larger than 1. Energy ratio increases with increasing the cluster size and velocity.

**Key words:** cluster; energy loss; nonlinear effect

\* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(19975034, 19975033, 10175041)