

低剂量离子在物体样品中透射行为的研究^{*}

薛建明 · 王宇钢 · 卢希庭 · 颜 · 莎 · 赵渭江

摘要 · 利用金硅面垒探测器测量低剂量率的F离子在生物组织样品(洋葱内表皮和芸豆种皮)中的透射能谱,用来研究荷能离子在生物样品中的能损和深度分布。实验中F离子能量为900keV-6MeV,剂量率大约为 10^4 ions/s·cm;用SEM观测样品在离子束轰击下可能发生的损伤。实验中测量了不同能量离子在样品中的透射能谱,利用SINRA对测量得到的透射能谱进行了拟合分析,并讨论了生物样品的特殊结构对透射能谱和离子深度分布测量结果的影响。

关键词 · 离子注入,生物效应,透射测量

Transmission measurement of low dose rate ions in biological samples

XUE Jianming · WANG Yugang · LU Xiting · YAN Sha · ZHAO Weijiang

(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

In order to study energetic ion range and depth profile in biological samples, transmission spectra of F ions through kidney bean coat samples and onion inner surface membrane samples have been measured with a silicon surface detector. The ion beam energy ranged from 900keV to 6MeV at a low dose rate of about 10^4 ions/s·cm²; SEM experiment was carried out to observe sample's topography after ion irradiation. The spectra were simulated by using computer software SINRA. The influence of biological sample's special structure and composition on ion space range and depth profile was discussed.

Key words Ion implantation, Biological effect, Transmission measurement

离子束技术在辐射生物学、基因工程及培育优良植物、微生物品种领域的应用正日益受到重视。80年代后期,中国科学家在植物、微生物育种以及外源基因转移等方面的研究取得了很大进展,实验发现,N⁺等离子对水稻^[1,2]、小麦^[3]、棉花^[4]、右旋糖酐生产菌^[5]等具有明显的诱导基因突变作用,获得了可观的社会和经济效益。但目前该方面的研究仍然处于初步阶段,还有许多问题,尤其是离子束生物效应中的许多物理问题仍然没有能够解决,对于离子束在生物样品中反常空间分布等问题还没有能够解释^[6,7],因此研究离子在生物样品中的射程和分布是目前该领域中非常重要的工作。

由于生物样品容易损伤和变形,对样品在离子注入后的处理很容易给离子浓度和空间分布的测量带来很大误差。本文通过在线测量离子在薄生物样品中的透射能谱来研究离子在生物样品中的行为,避免了上述误差因素,得到了比较精确可靠的结果。对离子在生物样品中的特殊空间分布进行了讨论。

1 实验方法

1.1 · 实验样品

透射实验中使用了两种生物样品,其一为洋葱内表皮,一般由单层或基层细胞构成,结构比较简单,平均面密度在0.9mg/cm²左右;另一种样品为芸豆种皮,用来研究离子在实际种皮中的透射行为,其平均面密度为10.5mg/cm²。

1.2 · 实验安排

离子透射实验在北京大学2×1.7MV串列加速器上进行,实验安排如图1所示。为使离子束轰击不对样品产

生明显的损伤,实验中所用离子束流密度必须很低。由于加速器无法直接提供合适的束流。实验中利用离子在4nm金膜(Si基体)背散射产生的次级束来轰击样品;透射离子能谱利用金硅面垒探测器检测,探测器方位与初级离子束之间夹角为 165° ,同时在与样品对称的位置上放置另外一个探测器,用来在线监测注入离子剂量(图1)。入射F离子的剂量率保持在 $10^4 \text{ ions/s} \cdot \text{cm}^2$ 以下,总剂量不大于 $10^7 \text{ ions/s} \cdot \text{cm}^2$;初级离子能量分别为900keV、1.0、1.5、2、3、4.5、6MeV,实验中1、1.5、2、3MeV离子的透射实验共用同一个样品,其它能量的离子共用另一个样品。

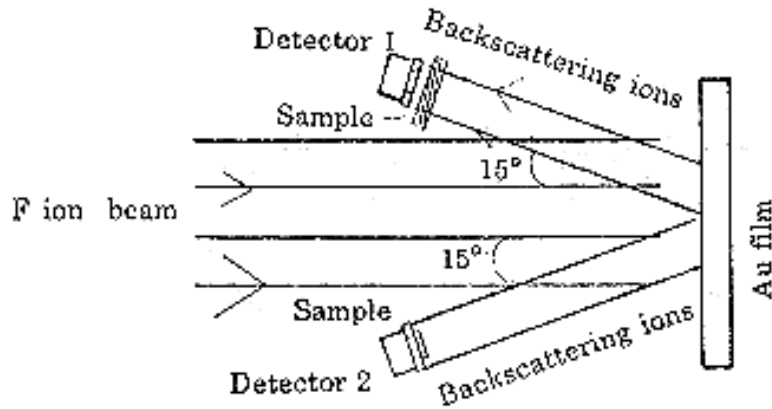


图1 透射实验安排示意图

Fig.1 · Schematic diagram of the transmission measurement

利用德国等离子体物理所最新编制的SINRA程序来模拟实验中得到的离子透射能谱,用SINRA程序来比较新的根据两体碰撞理论设计的程序,能够模拟等重离子的背散射能谱以及离子在薄样品中的透射能谱。对实验结果和模拟结果进行讨论比较;在实验中,SEM技术用来观测样品的表面结构和损伤。

2 实验结果及讨论

2.1 离子在洋葱样品中的透射能谱

离子在该样品中的透射能谱测量结果如图2所示,图中标能量为初级离子能量。从图2可以看出,当初级离子能量为900keV时,没有测量到任何透射离子的能谱,表明该能量的离子是不能穿透样品的;当离子能量上升到1MeV时,则可以测量到少数透射离子,透射离子能量比较低,其能谱形状与次级入射离子的高斯能峰完全不同;随入射离子能量的上升,透射离子能谱渐渐向高能端移动,离子透射率也随之提高,例如当离子能量从4.5MeV上升到6MeV时,离子透射率由原来的0.7%上升到1.8%。

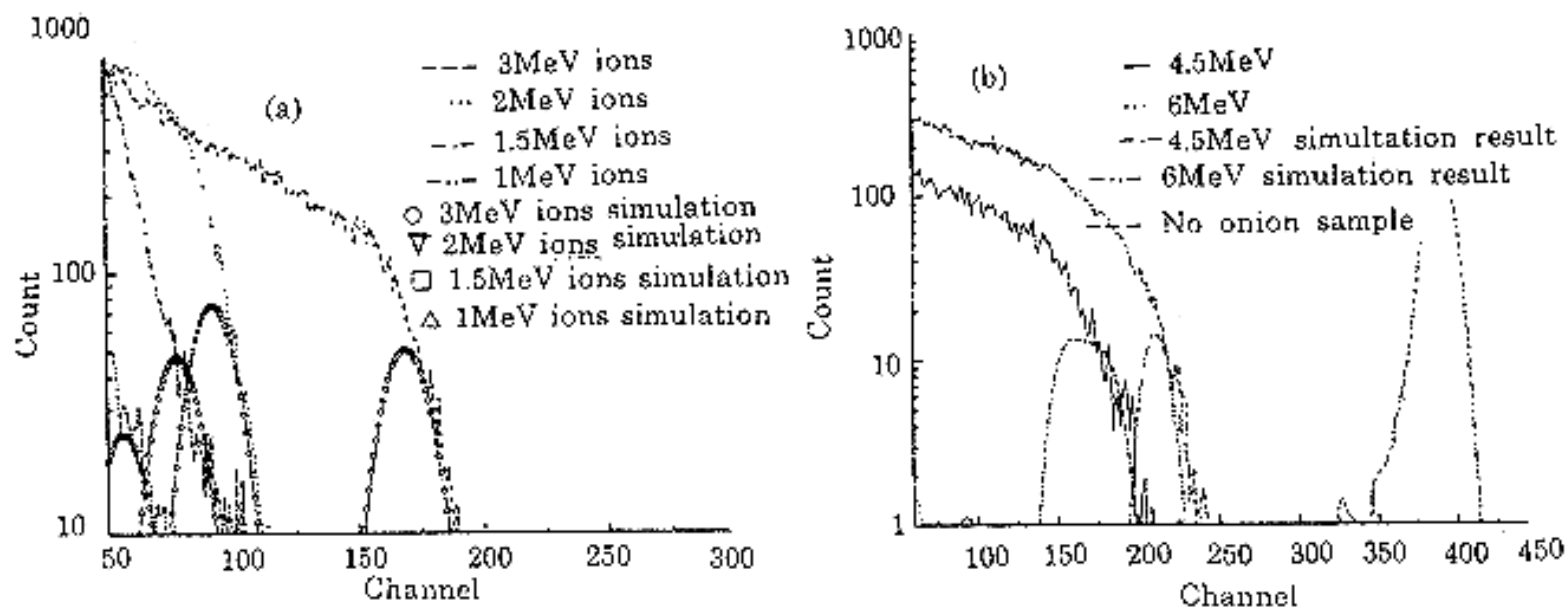


图2 不同能量F离子在洋葱样品中的透射能谱及SINRA对能谱上升沿的拟合结果
(a) 样品1,(b) 样品2

Fig.2 · f003 Spectra of F ions with different energy through onion samples and SINRA simulation result
(a) Sample 1, (b) Sample 2

洋葱样品的主要成分是C、H、O,但各种元素之间的具体比例很难精确确定。考虑到它们之间含量变化对理论计算结果的影响不大,实验中采用的C:O:H=3:3:4作为样品的元素组成,并利用TRIM95计算荷能离子在其中的射程,结果如表1所示。此处所说的“射程”是指离子在均匀材料中的射程,而以下出现的“空间射程”则是指离子在不均匀材料中走过的空间距离,与上述射程概念有所不同。可以看出,即使是初级离子能量为6MeV的F离子(背散射K因子约为0.7),其射程也大约只有0.6mg/cm²,而样品平均面密度为0.9mg/cm²,因此上述能量的F离子应无法穿透样品。但在实验中,初级能量为1MeV的离子就有少量能够穿透样品。

表1 · F离子在生物样品(组成C₃H₄O₃)中的射程(TRIM)
Table 1 Projectile range of F ions in biological samples (C₃H₄O₃)

离子能量 E/MeV	质量面 密度 Surface mass density/ mg·cm ⁻²
0.5	0.163
0.9	0.243
1.0	0.260
1.5	0.329
2.0	0.386
3.0	0.481
4.5	0.609

6.0	0.731
-----	-------

图3是样品的SEM照片,可以看出样品的结构很不均匀,质量厚度差别较大。我们认为,上述离子透射现象是由于生物样品质量分布不均匀,即其面密度相差很大而造成的:样品某些区域质量厚度可能远远低于平均值,为少量离子的透射创造了条件;穿过样品最薄区域离子能损最少,这部分透射离子形成能谱中的上升沿。

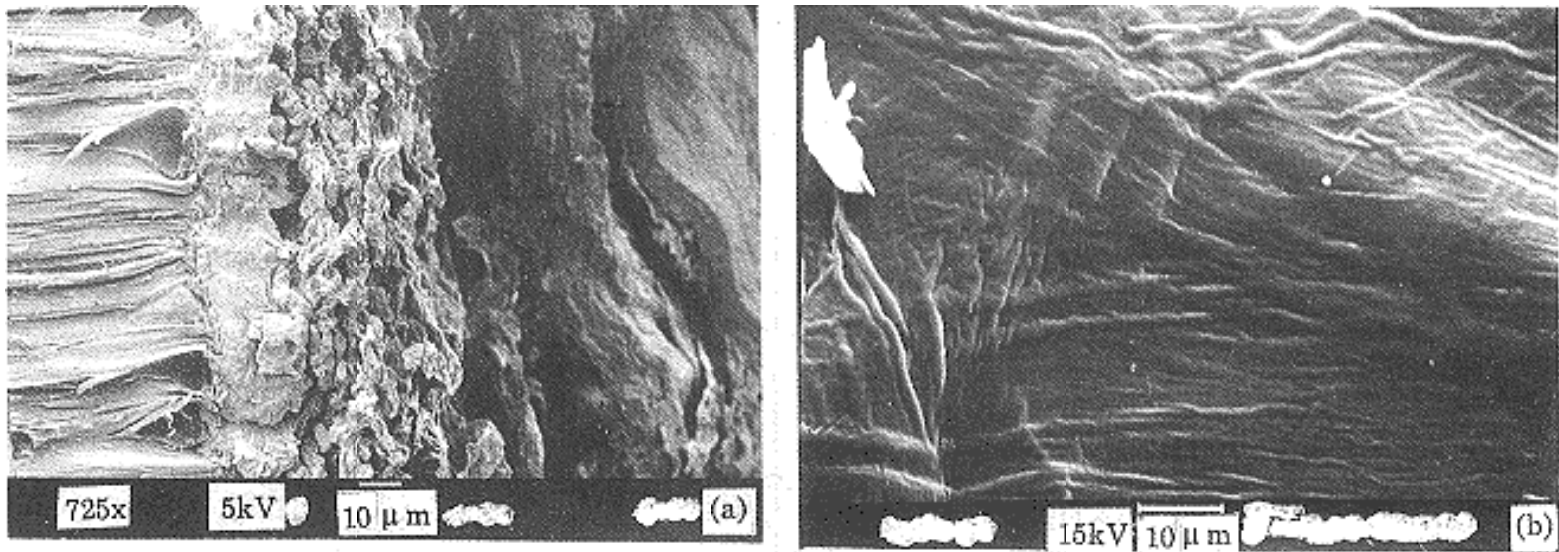


图3 SEM观测得的样品结构图
Fig.3 Sample's topography observed by SEM

根据上述分析,对于同一个样品,其质量空间分布一定,不同能量离子的透射能谱上升沿应遵守一定的规律而变化。如果已有理论仍然适合应用于生物体样品,则当入射离子能量变化时,透射能谱上升沿能量的变化应与两体碰撞的理论预计一致。

首先利用SINRA对能量为6MeV的离子透射能谱进行拟合,得到洋葱样品面密度最小为 1.2×10^{19} atoms/cm²;然后据此利用SINRA来计算其他能量离子透射能谱上升沿形状,结果如图4所示。从图4可以看出,拟合结果与实验测量能谱完全一致,表明透射离子的能损仍然可以利用两体碰撞理论来描述。

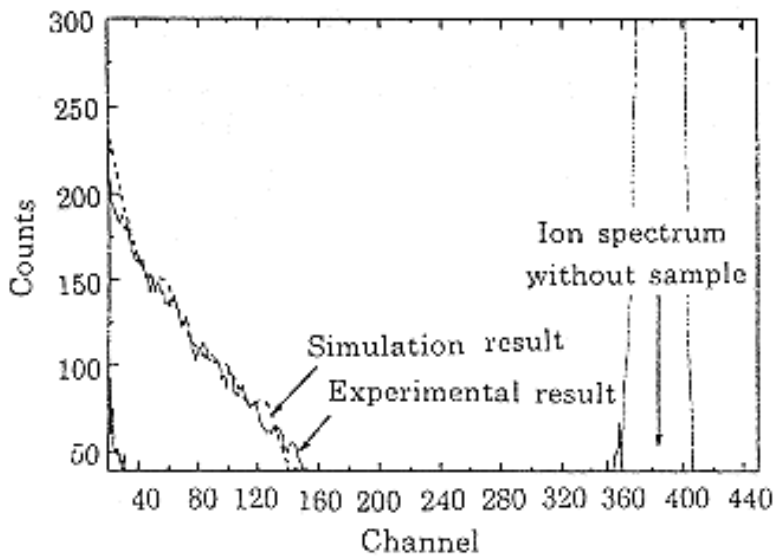


图4 f0034.5MeV F离子的透射能谱及拟合结果
Fig.4 Fitting of the transmission spectra of 4.5MeV F ions

显然,对应样品不同厚度区域透射离子能量(能损)不同,而所有这些能峰叠加形成实验中得到的透射能谱。对于同一个样品,拟合不同能量离子透射能谱得到的样品质量厚度分布应该一致,为此我们对4.5MeV和6MeV入射离子的透射能谱进行了拟合。具体方法为,将样品的质量厚度从 $1.2 \times 10^{19} \text{atoms/cm}^2$ 到 $3.3 \times 10^{19} \text{atoms/cm}^2$ 分成10个等级,分别对应透射能谱中10个不同能量段的离子;而不同能量段透射离子计数率则表明该厚度区域面积的大小;图5是SINRA程序的拟合结果。从图5可以看出,根据4.5MeV和6MeV透射离子能谱得到的样品质量分布在误差范围内完全一致。这表明透射能谱确实是由透过样品厚度不同区域的离子叠加而成的。

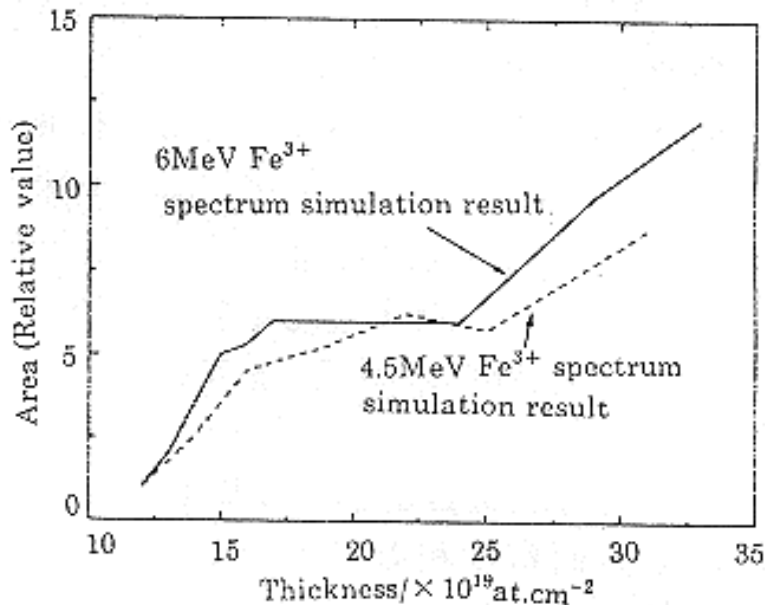


图5 不同能量离子透射能谱拟合样品2质量厚度分布结果
Fig.5 Sample 2 mass distribution derived from the transmission spectra

以上结果表明,荷能离子在生物样品中仍然遵守两体碰撞的理论,但是由于样品结构的极度不均匀,离子的空间射程及其在样品中分布的深度可以远远大于利用样品平均质量密度得到的离子射程。

2.2 · 芸豆种皮样品的测量

实验中测量了芸豆种皮样品中离子束的透射能谱。结果表明,在剂量为 10^6ions/cm^2 、能量为6MeV的 F^{3+} 辐照下,没有测量到任何透射离子。这表明,尽管芸豆样品的质量密度也可能存在较大差别,但是样品最薄处的质量厚度仍然大于离子束的最大射程,离子不能穿透芸豆皮样品。

样品在上述实验结束后,均在SEM(10000倍)下进行观测,没有发现样品损伤和结构变化。由于在上述实验中离子束剂量比较低(10^6ions/cm^2),严格地讲,这些实验结果并不能排除一些可能存在的小概率透射事件,但是其存在概率不会大于 10^{-6} 。同时,高剂量离子注入会对生物样品的结构产生明显的影响,离子的射程和深度分布会因此而变化,这些变化将在其它文章中进行讨论。

3 结论

实验测量了不同能量的F离子在洋葱样品和芸豆种皮中的透射能谱,并利用两体碰撞理论对透射能谱进行了拟合和解释。结果表明,在低剂量离子作用下,离子轰击没有对样品产生明显损伤。离子在生物样品中的能量损失仍然遵守两体碰撞的理论;但是由于生物样品质量分布在空间上的不均匀性,离子束的空间射程和空间深度分布可以远大于根据平均质量密度计算得到的离子射程,离子可以透过空间厚度远远大于其射程的生物样品。

* 国家自然科学基金和北京大学青年科学基金资助

作者单位：薛建明·王宇钢·卢希庭·颜·莎·赵渭江(北京大学重离子物理研究所·北京·100871)

参考文献

- 1 王学栋,吴跃进. 安徽农业科学,1988,(3):95-99
- 2 余增亮,何建军,等. 安徽农业科学,1989,(1):12-16
- 3 朱风绥,等. 作物学报,1993,19(4):299-302
- 4 程备久,李展,等. 核农学报,1993,7(2) · 73-80
- 5 罗大珍,王宇钢,等. 微生物学报,1997,37(4):312-315
- 6 苏一,李毅,等. 第八届全国三束年会论文集,1995. 89-92
- 7 颌红梅,卫增泉. 核技术,1997,20(2):105-107

收稿日期·1998-03-26,修回日期·1998-09-01