

低能重离子注入花生干种子深度-浓度分布的方向效应研究*

谢竞祎 周宏余 王 平 丁晓纪 刘志国 宋 海 陆 挺 朱光华

(北京师范大学射线束技术与材料改性教育部重点实验室 北京师范大学低能核物理研究所 北京师范大学材料科学与工程系 北京 100875)

(2002 年 12 月 12 日收到 2003 年 2 月 26 日收到修改稿)

用双光子激光扫描显微镜技术观测 200keV V^+ 离子从不同方向注入花生干种子的深度-浓度分布,发现沿纵向和横向注入的离子在样品中的深度-浓度分布有显著差别,即分布具有方向效应.初步分析了造成注入离子分布出现方向效应的原因.

关键词:离子注入,植物种子,深度-浓度分布,方向效应

PACC:6180J

1. 引 言

自 20 世纪 80 年代以来,载能离子束注入生物种子能产生显著的遗传诱变效应的事实已被广泛验证^[1,2].离子束作为新的诱变源已经为越来越多的物理学家、生物学家所关注.问题的焦点集中在质、能、电三位一体的低能离子怎样进入生物体,进入生物体后沉积的深度-浓度分布规律,以及沉积所造成的影响.这直接关系到注入离子与生物的遗传物质相互作用引起生物诱变的机理.

近年来对低能重离子注入植物干种子深度-浓度分布的研究,已经取得了很大的进展.对 200keV 的 V^+ 注入花生种子的实验,陆挺首次用正电子湮没技术(PAT)证明注入离子对 200 μm 的深度有影响^[3].朱光华等人用切片质子激发 x 射线荧光分析(PIXE)和扫描电镜(SEM)+x 射线能谱微区分析给出了 0—135 μm 深度范围的分布曲线^[4,5];周宏余等用更高灵敏度的双光子激光扫描显微镜(TPLSM)观察到注入离子的分布范围超过 800 μm ^[6];而王超等用射程理论(Lindhard Scharff Schiott Theory, LSS)计算这样低能的离子在花生种子中的射程只有 0.4 μm ^[7].也就是说,基于均匀凝聚态物质建立起来的射程理论完全不适用于低能离子和生物体的相互作用.那么低能离子和生物体的相互作用到底遵循

什么规律?探索这个问题无论是对基础研究还是对应用研究都是有意义的.

最近的研究表明,当离子分别沿纵向和横向注入花生干种子样品时,其深度-浓度分布有明显差异.为了了解和分析这种差异,本文对注入离子的深度-浓度分布曲线的形状、从不同方向上的注入离子的平均射程等问题进行了深入的研究,初步探讨了造成注入离子分布具有方向效应的原因.

2. 样品制备

花生种子主要包括子叶、种胚、胚芽三部分(如图 1 所示)^[8],其密度为 1.01g/cm³,接近于水的密度.选用当年风干的花生子叶,将其切成 4mm × 8mm × 12mm(长 × 宽 × 高)的小块,截面方式有两种:1)截面和胚轴方向平行(纵截面);2)截面和胚轴方向垂直(横截面).将准备好的立方体样品固定于靶托上,使截面与离子入射方向垂直.

3. 离子注入

样品注入和分析的安排如图 2 所示.为便于理解,图 2 中把样品的注入和分析标在一起了,实际上这两个过程在时间上是完全分开的,是先注入,后分析.

* 国家自然科学基金重大项目(批准号:19890303)资助的课题.

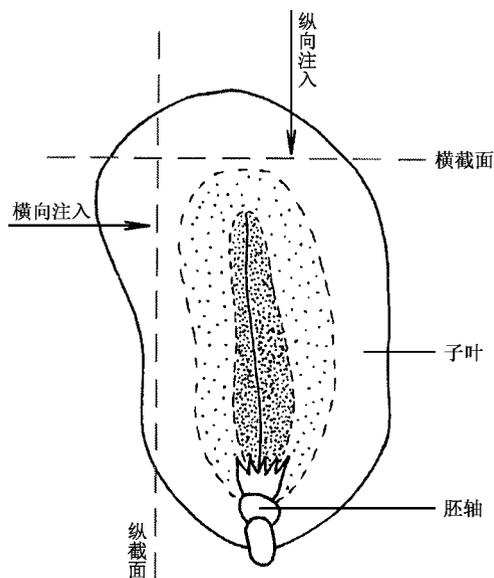


图1 花生纵剖面图^[7]及注入方式说明

将样品离子注入截面的一半用 $100\mu\text{m}$ 厚的铝箔包住(图2中的阴影部分)以阻挡离子束,另一半裸露在离子束下.对于切面为纵截面的样品,离子注入方向为横向,对于切面为横截面的样品,离子注入方向为纵向.

离子注入在北师大低能核物理研究所的 400keV 离子注入机上进行,以扫描的方式将能量为 200keV 的 V^+ 均匀且垂直地注入花生样品.离子注入剂量为 $9 \times 10^{16}/\text{cm}^2$,束流为 $0.4\mu\text{A}/\text{cm}^2$,靶室真空度为 $(6-7) \times 10^{-4} \text{Pa}$,整个注入过程持续 24h .采取这种小束流、长时间的注入方式是为了尽量减少注入离子对样品结构的损伤.

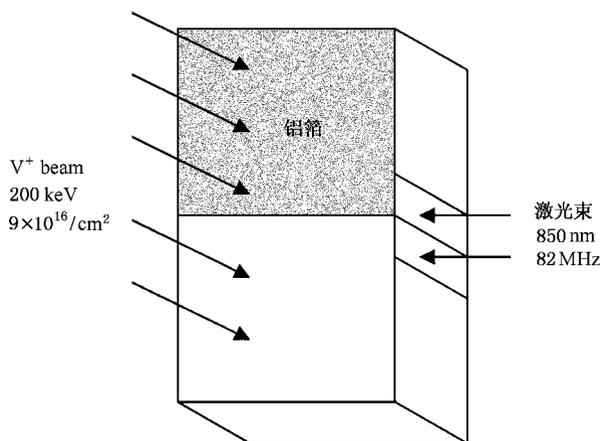


图2 花生样品的离子注入和 TPLSM 分析实验安排示意图

4. 注入离子深度-浓度分布的 TPLSM 分析

离子注入完成以后,用 TPLSM 分析样品.首先从样品上剥去包覆的铝箔,再用刀片从离子入射面的背面与入射束平行逆入射束方向将样品切开,取其中一半被切开的新鲜表面用于 TPLSM 分析.逆入射束方向切割是为了避免切割刀片将浓度较高区域的注入离子带入低浓度区域,造成分析不准确.在分析时必须使 TPLSM 的平行激光束垂直入射切开样品的新鲜表面.

TPLSM 的工作原理是以双光子激发为基础的.双光子激发是 1931 年由 Goppert-Mayer 从理论上预言^[9]并在 30 年后被实验观察到.它来源于两个光子的同时吸收,其能量基本上为两光子的能量之和.例如两个红光光子能够激发出一个紫外光子.因为双光子激发需要两个光子,它的激发概率取决于激发光源瞬时强度的平方.TPLSM 发明于上世纪 80 年代^[10],它有两个突出优点:一是具有亚微米级的空间分辨率;二是由于它既不会产生韧致辐射本底,又能几乎完全避免低能单光子激发产生的荧光本底,因而有非常高的信号本底比.本文用的 TPLSM 是由 BioRad 公司生产的 MRC1024 MP,它具有 82MHz 的锁模频率、 70fs 的脉冲宽度、 $720-1080\text{nm}$ 的波长范围、 $0.2\mu\text{m} \times 0.6\mu\text{m}$ 的最高空间分辨率.本实验选用的激光束的扫描范围为 $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$,跨越样品注入区和覆盖区的分界线,并越过样品表面,以使注入区和周围环境形成一个鲜明对比.扫描矩阵是 $512 \text{点} \times 512 \text{点}$,两点之间的空间距离是 $2.54\mu\text{m}$.

5. 结果和讨论

图3(a)(b)是花生1与花生2样品分别经 200keV 的 V^+ 沿横向与纵向注入后,由 TPLSM 用 850nm 波长的入射光和 $460-600\text{nm}$ 的带通光学滤波器扫描所得的荧光图像.荧光强度的分布就反应了注入钒离子的分布.图4(a)(b)是分别由图3(a)(b)注入区的荧光强度分布转化得到的相应的深度-浓度分布曲线图,它们表示了注入钒离子由表及里的分布.其纵坐标的浓度值只具有相对意义.

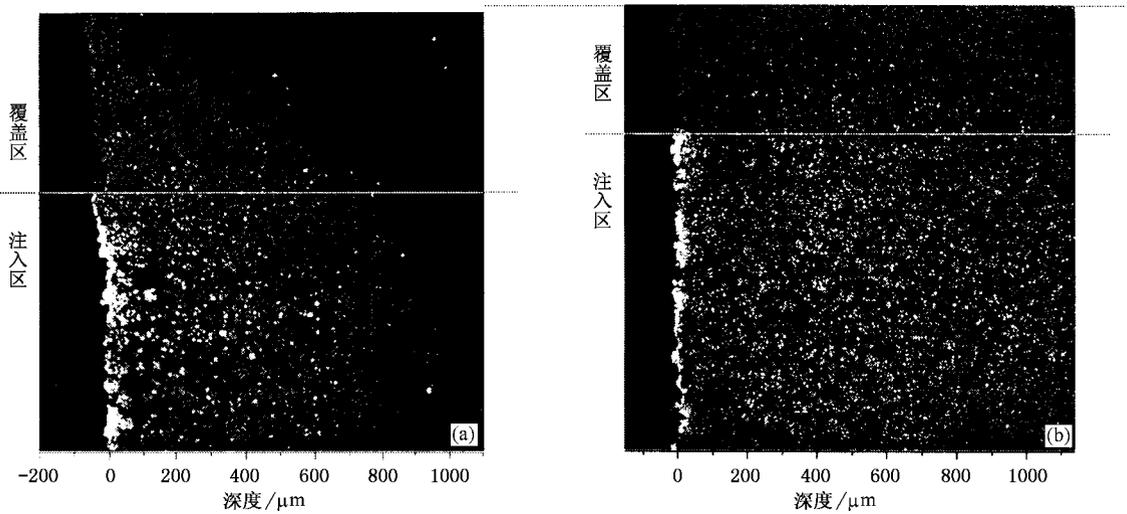


图3 200keV的 V^+ 注入花生干种子样品后采用 TPLSM 扫描得到的荧光图 (a)横向注入 (b)纵向注入

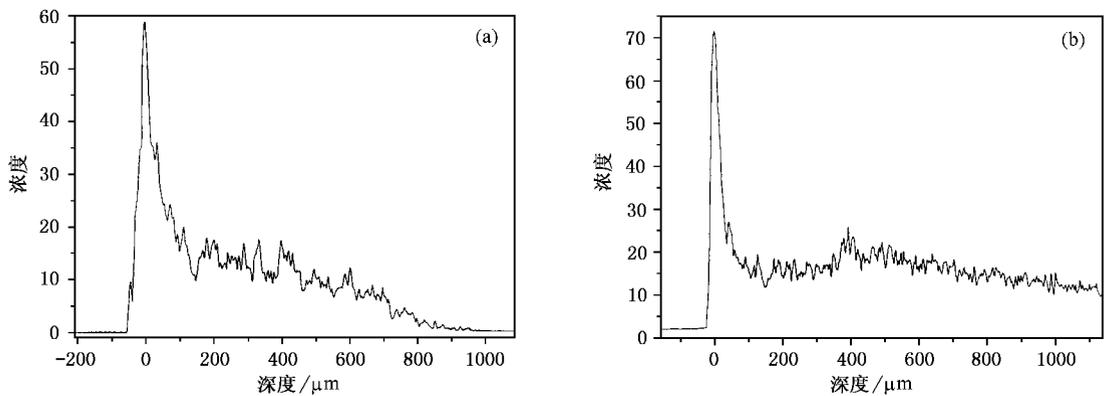


图4 转化后得到的深度-浓度分布图 (a)从图3(a)转化所得 (b)从图3(b)转化所得

分别比较图4(a)与图4(b),可见200keV V^+ 沿花生子叶横向与纵向注入后的分布有明显的差异.由图可见,离子浓度变化在最初阶段是很相似的,即在达到峰值后马上经历了一个极为迅速的衰减过程.这表明样品表层阻停了大量的离子,使得这个区域的离子沉积浓度最大.在峰值点以后的离子浓度分布曲线形状就有了明显差异:在离子沿纵向注入的样品中(图4(b)),离子浓度分布有一个很长的平台,在平台区离子浓度有起伏,但起伏不大,在400—600 μm 深处似乎有一很宽的峰;而在离子沿横向注入的样品中,离子浓度衰减速度很快,没有平台.从注入离子的最大射程看,差别更加突出.图4(b)右端对应的深度为1140 μm ,而离子浓度仍未衰减至零;在图4(a)中,离子浓度在800—900 μm 深度已经衰减至零.虽然由于扫描范围的限制,无法看到

纵向注入离子的浓度在什么深度衰减至零,目前还无法知道它的最大射程,但根据已有的实验结果初步计算出离子在横向注入样品中的平均射程为290.5 μm ,在纵向注入样品中的平均射程为503.4 μm .如前所述,如图3(a)所示的横向注入的最大射程已经测定,因此其平均射程是准确的,而纵向注入的最大射程已经超出现在的测量范围,实际的平均射程比现在给出的还要大.所以可以肯定,沿纵向注入的离子在样品中的平均射程远大于沿横向注入的离子的平均射程.

为什么纵向注入比横向注入离子所达到的最大射程和平均射程都要大?这种类似晶体沟道效应的生物沟道效应是如何产生的?要解释这些问题,就要研究生物样品的结构.陆挺等人的正电子湮没实验研究已经证明:干的花生子叶是一种结构疏松的

多孔物质,在干的花生子叶中有 16% 的体积是平均直径为 0.7nm 的孔洞^[11],这是 LSS 理论对生物体不适用的主要原因.如果再设想花生子叶中的这些孔

径大小有一定的分布,沿纵向的孔径大,沿横向的孔径小,则前面所发现的不同方向上注入离子的深度-浓度分布差异就可以得到合理的解释.

- [1] Yu Z L 1998 *An Introduction to Ion Beam Technology in Biology* (Hefei : Anhui Science and Technology Publication House)(in Chinese) 余增亮 1998 离子束生物技术引论(合肥 :安徽科学技术出版社)]
- [2] Yu Z L 2000 *IEEE Transactions on Plasma Science* **28** 128
- [3] Lu T *et al* 2001 *Chin. Phys.* **10** 145 (in Chinese) 陆挺等 2001 中国物理 **10** 145]
- [4] Zhu G H *et al* 2001 *Nucl. Tech.* **24** 456 (in Chinese) 朱光华等 2001 核技术 **24** 456]
- [5] Wang X F *et al* 2001 *Nucl. Sci. Tech.* **12** 26
- [6] Zhou H Y *et al* 2002 *Proc. 3rd National Conf. of Ion Beam Bio-engineering and 1st Inter. Symposium on Ion Beams* **34** (in Chinese) [周宏余等 2002 第三次全国离子束生物工程学大会暨第一次国际学术研讨会论文集 **34**]
- [7] Wang C *et al* 2001 *Acta Biophys. Sin.* **17** 351 (in Chinese) [王超等 2001 生物物理学报 **17** 351]
- [8] Yan Q C 2000 *Seed Science* (Beijing : Chinese Agriculture Publication House)(in Chinese) 颜启传 2000 种子学(北京 :中国农业出版社)]
- [9] Goppert-Mayer M 1931 *Ann. Phys.* **9** 273
- [10] Winfrid Denk *et al* 1995 *Two-Photon Molecular Excitation in Laser-Scanning Microscopy, Handbook of Biological Microscopy* (New York : Plenum Press)
- [11] Lu T *et al* 2002 *Wuli (Physics)* [陆挺等 2002 物理 **31** 555]

A study of directional effect of depth-concentration distribution for implanted heavy ions with low energies in dry peanut seeds *

Xie Jing-Yi Zhou Hong-Yu Wang Ping Ding Xiao-Ji Liu Zhi-Guo Song Hai Lu Ting Zhu Guang-Hua

(Key Laboratory for Beam Technology and Material Modification of Ministry of Education , Institute of Low Energy Nuclear Physics ,
Department of Materials Science and Engineering , Beijing Normal University , Beijing 100875 , China)

(Received 12 December 2002 ; revised manuscript received 26 February 2003)

Abstract

The depth-concentration distribution in dry peanut seeds for implanted V^+ at 200keV was measured by two-photon laser scanning microscope. It was observed that when the ions were implanted into peanut samples along longitudinal direction and transverse direction , the corresponding depth-concentration distribution curves possess different shapes and characteristics. This is called directional effect. The origin of this directional effect was studied primarily.

Keywords : ion implantation , plant seeds , depth-concentration distribution , directional effect

PACC : 6180J

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19890303).