

# 低能重离子注入小麦胚内的作用范围

卫增泉 刘玉岩 王桂玲 马受武

(中国科学院近代物理研究所, 兰州730000)

杨汉民 高清祥 韩榕 王亚馥

(兰州大学, 兰州730000)

**摘要** 根据 LSS 理论计算和采用 Rutherford 背散射实验方法(RBS), 测定和分析了低能重离子(110 keV Fe<sup>+</sup>)注入小麦种子后离子达到的深度。测定结果和计算结果相符合, 平均射程约为 115 nm。还从核物理学和辐射化学考虑了离子的热穗效应(thermal spike effect)、亚激发电子的位移以及次级电子的热化尾巴(thermalization tail)等可能造成作用范围的扩大, 并对它们进行了初步的理论估算。

**关键词** 低能重离子, 小麦, LSS 理论, 卢瑟福背散射, 热穗效应, 亚激发电子, 热化尾巴

随着重离子生物效应研究的逐步深入, 目前已涉及到形成这种效应的机理探讨。国外已有许多作者测量到在重离子束径迹周围波及的细胞受损范围比用微剂量学理论预言的大<sup>[1-3]</sup>, 他们把这种现象叫做长射程效应。本文采用非常低能量(约 110 keV)的重离子(C<sup>+</sup>, N<sup>+</sup>, Fe<sup>+</sup>), 从已剥去果皮和种皮的小麦种子胚侧注入, 从萌发的根尖细胞中观察到了较明显的染色体畸变<sup>[4]</sup>, 按照植物细胞线度的大小一般在几十微米左右, 说明即使最表面单层细胞的细胞核受损也需要有射程在 10 μm 以上的离子束。本文就上述低能重离子注入到小麦胚内所能达到的作用范围进行初步探讨。

## 1 离子注入的射程分布

### 1.1 理论计算

按照 LSS 理论<sup>[5]</sup>, 入射离子在靶中的投影射程分布  $R_p \pm \Delta R_p$ , 可根据其电子和原子碰撞阻止本领来求得。对单个入射离子, 单位路程上的能量损失为

$$-\frac{dE}{dx} = N[Sn(E) + Se(E)] \quad (1)$$

式中, E 为入射离子在 X 点的能量, Sn(E) 和 Se(E) 分别是原子核的和电子的阻止截面, N 是单位体积内靶原子的平均数。于是, 平均总射程为

$$R = \int_0^R dx = \frac{1}{N} \int_0^{E_0} dE / [Sn(E) + Se(E)] \quad (2)$$

式中, E<sub>0</sub> 是入射离子的初始能量。在一级近似中, 把生物体内的电子认为是自由电子气, Sn(E) 和入射离子能量 E 无关, 这样

$$Sn^0 = 2.8 \times 10^{-16} \frac{Z_1 Z_2}{(Z)^{1/3}} \cdot \frac{M_1}{M_1 + M_2} \text{ (eV} \cdot \text{cm}^2) \quad (3)$$

式中  $(Z)^{1/3} = (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}$ , Z<sub>1</sub>, M<sub>1</sub> 和 Z<sub>2</sub>, M<sub>2</sub> 分别是入射离子和靶原子的原子序数和质量数。

国家自然科学基金资助项目

收稿日期: 1992-01-15

在一级近似中,  $Se(E)$ 和入射离子的速度总是成正比

$$Se(E) = KE^{1/2} \tag{4}$$

式中,  $K = Z_1^{1/6} \cdot \frac{0.0793 Z_1^{1/2} Z_2^{1/2} \cdot (M_1 + M_2)^{3/2}}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{3/4} \cdot M_1^{3/2} M_2^{1/2}} \times 10^{-16} [(eV)^{1/2} - cm^2]$ , 射程的相对平方偏差是

$$\frac{(\Delta R)^2}{R^2} = \frac{S-1}{S(2S-1)} \cdot \gamma \tag{5}$$

式中,  $S=1$  是简单的库仑屏蔽势,  $S=2$  是 Thomas-Fermi 势,  $\gamma = \frac{4 M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2}$ , 对于低离子,  $S=2$ , 则

$$\Delta R = \pm R \sqrt{\frac{2 M_1 M_2}{3(M_1 + M_2)^2}} \tag{6}$$

现以近代物理研究所 200 kV 离子注入机用  $Fe^+$  注入小麦种胚为例, 注入离子为  $Fe^+$ , 注入能量 110 keV, 注入剂量  $10^{17} Fe^+/cm^2$ . 注入机采用双 PIG 离子源, 离子束经加速、 $90^\circ$  偏转后聚焦, 再经扫描进入靶室。取束流直径为  $\phi 55 mm$ . 真空度为  $1.3 \times 10^{-4} Pa$ , 束流强度约  $0.5 \mu A$ .

注入样品小麦内约含 70% 淀粉, 它的分子式为  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , 密度为  $1.32 g/cm^3$ , 由此可算出淀粉靶的平均原子序数和平均质量数:  $\bar{Z}_2 = 4.1, \bar{M}_2 = 7.7$ . 由于  $Z_1 = 26, M_1 = 56$ , 则可得到  $K = 10^{-16} [(eV)^{1/2} - cm^2]$ .

对于重离子来说, 散射问题并不严重, 所以  $R_p$  可以近似为  $R$ . 采用(2)和(6)式计算得到的结果为  $R_p \pm \Delta R_p = (115 \pm 30.6) nm$ .

### 1.2 实验结果

实测  $Fe^+$  在小麦胚中的射程, 是采用能量为 2 MeV 的  $He^{2+}$  束打在注入样品上, 测其 Rutherford 背散射谱, 再经计算机解谱处理, 便得到 Fe 元素相对浓度随深度分布的曲线。由注

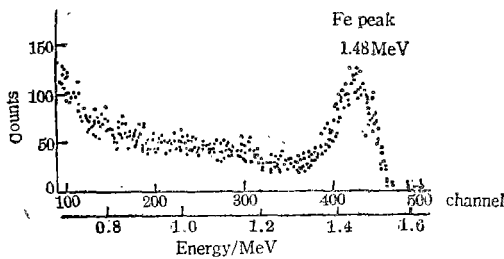


Fig 1. RBS of  $He^{2+}$  (2 MeV) in wheat embryo implanted by  $Fe^+$

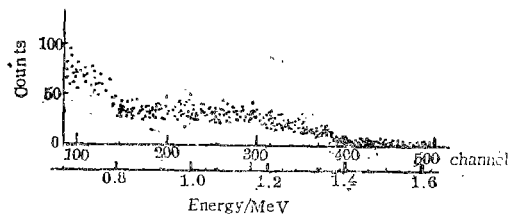


Fig 2. RBS of  $He^{2+}$  (2 MeV) in wheat embryo without implantation of  $Fe^+$

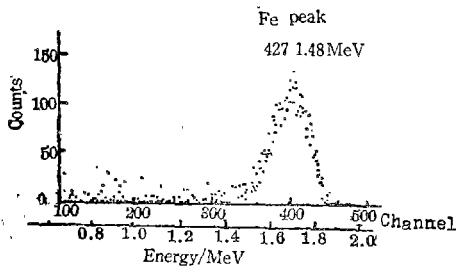


Fig 3. RBS of  $He^{2+}$  (2 MeV) in wheat embryo subtracting without implantation of  $Fe^+$  from implanted by  $Fe^+$

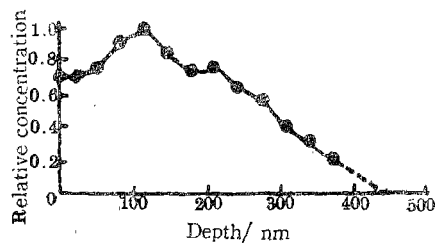


Fig 4. Longitudinal view of concentration for  $Fe^+$  implanting into wheat embryo

入总剂量及最可几深度可以算出其不同深度上的绝对浓度。

图1是在注入 $\text{Fe}^+$ 的小麦胚上, $\text{He}^{2+}$ 粒子的背散射谱。图2是在未注入 $\text{Fe}^+$ 的小麦胚上, $\text{He}^{2+}$ 粒子的背散射谱。图3是扣除本底后, $\text{He}^{2+}$ 粒子在小麦胚内Fe元素的背散射谱。图4表示了小麦胚内Fe元素的相对浓度与绝对浓度随深度的分布数据。Fe元素相对浓度最大处的深度为116 nm,它和理论计算值115 nm符合得相当好。该深度处的最大浓度为 $7.68 \times 10^8 \text{Fe}^+/\mu\text{m}^3$ 。

## 2 热穗效应

当重离子射入介质后,由于它们之间的相互作用,使高能离子逐渐损失能量而被阻止。当入射离子速度减到使其LET为 $10^3-10^4 \text{MeV/g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,在蛋白质中离子有效径迹宽度正比于失活截面<sup>[6]</sup>。在无限介质内,在离子径迹中心上 $r=0$ 处,由线能爆炸造成的温度分布可通过热传导方程得到

$$\theta = \theta_0 + \frac{Q}{\pi c \rho \cdot 4 kt} \exp\left(-\frac{r^2}{4 kt}\right) = \theta_0 + \frac{Q}{\pi \lambda \cdot 4 t} \exp\left(-\frac{r^2}{4 kt}\right) \quad (7)$$

式中, $\theta_0$ 是爆炸前介质的温度( $^\circ\text{C}$ ), $Q$ 是离子在单位长度上释放的热量( $\text{J/cm}$ ), $C$ 、 $\rho$ 、 $k$ 分别是介质的比热( $\text{J/g}\cdot^\circ\text{C}$ )、密度( $\text{g/cm}^3$ )、热扩散系数( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),它们的乘积即为介质的热传导系数 $\lambda(\text{J/cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$  $t$ 为爆炸后的时间( $\text{s}$ )。

由(7)式很易算得一个圆柱形(在其内温度达到分解温度 $\theta_c \geq \theta$ )的最大截面为

$$\sigma = \pi r^2 = \frac{Q}{e \rho c (\theta_c - \theta_0)} = \frac{\text{LET}}{e c (\theta_c - \theta_0)} \quad (8)$$

式中, $e$ 为自然对数底数( $\approx 2.71828$ ),LET是重离子的传能线密度( $\text{MeV/g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )。当蛋白质受高温分解时,会转变成象石墨样的残渣,因而可预料分解区有着比原来蛋白质更高的热扩散系数,可近似认为横截分解区的温度分布是均匀的,于是(8)式就成为

$$\sigma = \pi r^2 = \frac{\text{LET}}{C(\theta_c - \theta_0)} \quad (9)$$

蛋白质分解会造成生物活性的丢失,所以失活截面应相应于分解区的截面。当离子在介质中停止时,由沉积的能量爆炸所形成的球体半径在离子原前进方向上就相应于所谓“长射程效应”的延伸深度

$$r = \left[ \frac{\text{LET}}{\pi C (\theta_c - \theta_0)} \right]^{1/2} \quad (10)$$

在一般条件下, $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ ,在该温度下典型蛋白质的平均比热为 $1.3 \text{J/g}\cdot^\circ\text{C}$ ,组成蛋白质的氨基酸分解温度 $\theta_c \approx 275^\circ\text{C}$ 。以110 keV的 $\text{Fe}^+$ 为例,其LET约为 $2 \times 10^3 \text{MeV/g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,则 $r = 5.6 \text{nm}$ 。

## 3 亚激发电子的位移

根据原子核物理学知道,带电粒子在通过介质时可以发生两类碰撞:一类是擦边碰撞,主要是入射粒子使介质电子激发到较高的能级上,这时处于激发状态的电子并不会从介质原子中逸出;另一类是撞出碰撞,介质电子就会被入射粒子撞出,形成次级电子,这类电子的最大能量为<sup>[7]</sup>

$$\epsilon_{\text{max}} = 2 m v^2 / (1 - \beta^2) \quad (11)$$

式中 $m$ 为电子的质量, $v$ 为入射粒子速度, $\beta = v/c$ , $c$ 为光速。

现以 110 keV 的  $\text{Fe}^+$  为例来求它注入小麦胚内产生的次级电子。首先用撞出撞碰(即使几率不大)来算出次级电子的最大能量,运用(11)式可得到  $\epsilon_{\max}$  为 4.27 eV。这个能量已低于作为小麦主要成分之一的水分子的第一激发态能量(6.5 eV),通常叫这种能量的电子为亚激发电子<sup>[8]</sup>。它们进一步损失能量的机制是分子振荡激发,这种激发过程有共振特性。根据测不准原理,这种振荡位置的不确定性为:

$$\Delta x \approx h\nu/\Delta E \quad (12)$$

式中,  $h = \hbar/4\pi$ ,  $\hbar$  为普朗克常数,  $\Delta E$  为典型的振动量子的能量,一般取 0.2 eV;  $\nu$  为亚激发电子的速度,由能量 4.27 eV 可得  $\nu$  为  $1.23 \times 10^8 \text{ cm/s}$ , 于是得到  $\Delta x \approx 2 \text{ nm}$ 。

#### 4 热化距离

对于入射电子(也可来源于重离子产生的次级电子)以低速(亚激发能)穿过介质时,主要能量损失机理是分子振荡激发。对于小麦这类由低原子序数原子组成的分子介质,存在一个约为 0.5 eV 的能量界线,在这能量以下,电子仍然是“热”的,还需要通过一定次数的弹性碰撞才能热化(达到室温)。电子从  $\sim 0.5 \text{ eV}$  慢化到  $\sim 0.04 \text{ eV}$ (相当于室温)所穿行的距离叫做热化尾巴,亦叫做热化距离。对于非极性介质的热化机理主要是弹性散射,这时热化距离可以近似估计为<sup>[9]</sup>

$$d_T = Ln^{1/2} \quad (13)$$

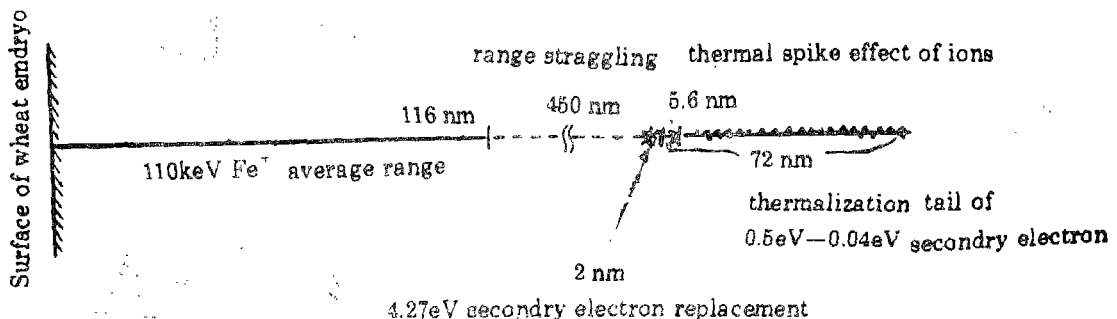
式中,  $L$  为散射的平均自由程,本文近似地取电子在碳氢化合物固体介质中的  $L$  值约为  $5 \times 10^{-10} \text{ m}$ ,  $n$  是达到热化所要求的弹性碰撞平均数

$$n = (\ln \epsilon_0 / \epsilon_{th}) / \ln \left( \frac{E_i}{E_{i+1}} \right) \quad (14)$$

式中,  $\epsilon_0$  是热化电子的起始能量, 0.5 eV;  $\epsilon_{th}$  是热化时的能量 ( $= \frac{3}{2} kT$ ), 0.04 eV;  $E_i$  和  $E_{i+1}$  分别是一次弹性碰撞前和后的能量,由于电子与水分子的碰撞主要是大角散射,这时(14)式分母值为  $1.21 \times 10^{-4}$ 。最后算得热化距离  $d_T = 72 \text{ nm}$ 。

#### 5 讨 论

根据上面计算,可以将 110 keV 的  $\text{Fe}^+$  在小麦胚内本身的射程及其歧离,与  $\text{Fe}^+$  引起的一些次级过程所造成作用范围的扩大可以示意如下:



就重离子本身的作用深度,最大也只能等于其射程。因为重离子与介质原子或电子相互作用具有统计学上的随机性质,所以射程就会发生歧离,在无沟道效应时服从高斯分布。但实测得到

的图4并不是严格的高斯分布,在小麦胚表面,Fe元素浓度的增大是 $Fe^+$ 离子在入射过程中由于散射效应造成的堆积。分布曲线的“拖尾”,增大了射程的歧离,这主要是由于小麦这种生物材料属于准晶结构,也会出现沟道效应。从结果可知,浓度占一定比例(例如22%)的离子可达370 nm,将图4曲线外推到浓度为零时,将近450 nm。但这样的深度也难以进入细胞核。即使加上离子本身在射程末端所造成的热穗效应也只能使它的作用范围扩充5—6 nm。

关于重离子造成的一些次级过程,由于它产生的次级电子能量很低,基本上就地消耗,由它们造成的分子振荡激发也只能得到2 nm左右的位移。然而,这些次级电子本身从0.5 eV慢化到0.04 eV(室温)时所拖的热化尾巴可达72 nm之长,但这时所耗散的剩余能量是微不足道的,因此热化尾巴对重离子作用范围尽管起了延伸的作用,但它沉积能量很少,对细胞的损伤作用并不会很大。

因此,低能重离子(这里讨论了110 keV的 $Fe^+$ )为什么会在比它射程更深处造成比较明显的生物效应,甚至使细胞核中的染色体受到了损伤,这是一个有待更深入研究的课题。

本工作得到了肖宗礼、付宝君等同志在重离子注入工作中的密切合作,还得到了刘正民等同志在RBS测量与解谱中的大力协助,在此一并表示感谢。

#### 参 考 文 献

- 1 Weisbrod U, Bücken H, Kraft G. GSI Scientific Report, 1986; 216
- 2 Takahashi Tan, Yatagai Fumio, Matsuyama Akira. IPCR Scientific Papers, 1980, 74: 51
- 3 Schäfer M, Facius R, Baltschukat K, Bücken H. Proc. of 7th Symp. on Microdosimetry, 1980, 2: 1331
- 4 卫增泉等. 辐射与环境生物物理研究, 中国科学技术出版社, 1992, 12: 122
- 5 Lindhard J et al.. Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk., 1964, 34: 1
- 6 Norman A, Spiegler P. J. Appl. Phys., 1962, 33: 2658
- 7 Chatterjee A et al.. Radiat. Res., 1973, 54: 479
- 8 Mozumder A. Advances in Radiation Chemistry, 1969, 1: 1

## EFFECT RANGE OF LOW ENERGY HEAVY IONS IMPLANTING INTO WHEAT EMBRYO

Wei Zengquan Liu Yuyan Wang Guiling Ma Shouwu  
(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)  
Yang Hanmin Gao Qingxiang Han Rong Wang Yafu  
(Lanzhou University, Lanzhou 730000)

**ABSTRACT** According to LSS theory the depth of low energy heavy ions implanting into wheat seeds was calculated in the paper. On the other hand, the depth was also measured and analysed by RBS method. Both of the results were consistent with each other. The average range was about 115 nm. Possible effect ranges induced by thermal spike effect of the ions, subexcitation electron amplitude and thermalization tail of the secondary electrons were discussed in view of nuclear physics and radiation chemistry were respectively valued.

**KEYWORDS** Heavy ion with low energy, Wheat, LSS theory, Rutherford back scattering, Thermal spike effect, Subexcitation electron, Thermalization tail