第20卷 第4期 空 间 科 学 学 报 Vol.20, No.4
2000 年 10月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 2000

高能重离子径迹结构对单粒子翻转的影响

韩建伟

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

利用解析法计算了高能重离子的径迹结构，通过 Monte Carlo 方法研究了径迹结构对微电子芯片单粒子翻转的影响. 结果表明，考虑了径迹结构的影响后，当离子能量较高时，具有小尺寸灵敏单元、低翻转阈值的芯片的翻转截面较传统的 LET 描述结果小许多；当离子更重时，这种差别对灵敏单元尺寸较大、翻转阈值较高的芯片也变得较明显. 即离子径迹结构的影响是通过其有效地沉积到灵敏单元中的能量与翻转阈值相比较而表现出来的. 还研究了作用距离较深、结构宽大的径迹造成的相邻多个灵敏单元的同时翻转，即多位翻转现象，这是用 LET 所不能反映的.

关键词 高能重离子－径迹结构－单粒子翻转－多位翻转

航天器在飞行中，遭遇到的高能重离子环境是非常复杂的 [1]—— 粒子种类多，能谱宽. 高能重离子同物质相互作用时，不仅在纵向有一定的射程，在横向也会由于二次电子的产生形成一定的径迹结构. 离子与物质在纵向的作用通常用 LET(Linear Energy Transfer) 值来反映. 考虑到芯片灵敏单元 (SV) 通常具有较小的纵向尺寸，假设离子与 SV 相互作用时 LET 值不变是合适的. 进一步忽略离子横向径迹结构，将其简化为一线性结构，计算其与 SV(如立方体模型) 的相互作用，可使计算大大简化 [2]. 同时将复杂的空间高能重离子环境用 LET 谱来描述，也是非常简单明了 [1]. 忽略离子径迹结构，对低能重离子是可行的，对于高能重离子，其径迹可达数微米，乃至十几微米，完全可与 SV 横向尺寸相比拟，此时忽略径迹结构是不合适的. 宽大的径迹结构还可以同时在相邻的多个单元沉积足够能量，或者具有较深作用距离的离子掠入射，先后穿透多个单元，这两种情况都会造成多位翻转. 这种多位翻转效应也是用 LET 概念所不能反映的. 本文对高能重离子径迹结构对单粒子翻转的影响加以研究.

1 离子径迹结构描述

根据 Robert[3] 等人的思路，我们得到高能重离子在硅材料中的能量沉积密度的径向分布如下：

$$D(r)=\frac{2.84\times10^4Z^{*2}}{\alpha\beta^2r(r+P)}\left(\frac{Q-r}{Q+P}\right)^{1/\alpha}, \tag{1}$$

其中 D 的单位为 $\mathrm{eV\cdot cm^{-3}}$,r 为离径迹核心的距离，单位为 cm, β 为离子速度与光速的比值， α 为一常数. Q 、 P 是电子在硅材料中的射程，分别定义如下：

1999-07-13 收到原稿， 2000-08-09 收到修定稿

$$P = F(I), \qquad I = 20\,\mathrm{eV}, \tag{2}$$

$$Q = F(W), \qquad W = 2mc^2\beta^2(1-\beta^2)^{-1/2}, \tag{3}$$

上述中 I 为二次电子产生的有效电离势， m 为电子静止质量， c 为光速， W 为二次电子可能具有的最大能量. 我们采用 Tabata[4] 等人提出的更准确的描述电子在任意材料中射程的半经验公式计算电子在硅中的射程. Z^* 为离子的有效电荷，其与离子原子序数 Z 及速度 β 有如下关系

$$Z^* = Z[1-\exp(-125\beta Z^{-2/3})], \tag{4}$$

系数 α 来源于如下的电子射程—能量经验公式

$$F(W) = kW^{\alpha}, \tag{5}$$

其中 k 、 α 均为常数. 我们根据由 Tabata[4] 等人的公式计算得到的电子在硅中的射程数据拟合，得到新的不同能段的 α 值，用来计算公式 (1).

这样，我们就用解析的方法计算得到重离子在硅材料中的径迹结构，结果与 Monte Carlo 方法 [5] 符合得很好，而且计算更简单、省时. 图 1 是我们计算的 500 MeV·nucleon^{-1} 的 Fe 、 Mg 、 O 三种离子在硅中能量沉积密度的径向分布.

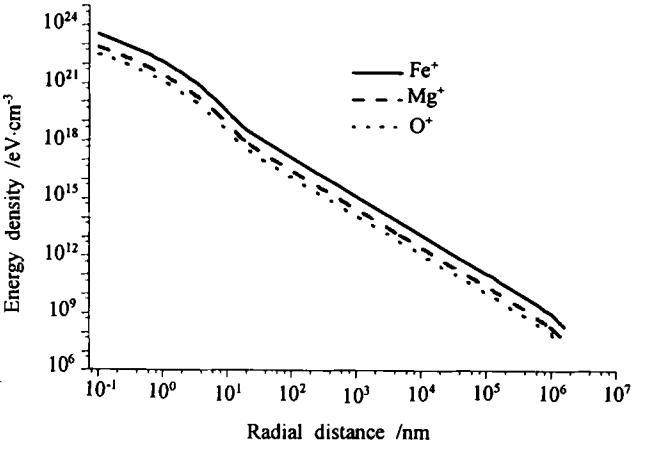

图 1 重离子径迹结构

Fig.1 Track structure for heavy ions

2 径迹结构对单粒子翻转的影响

在单粒子翻转效应中，由于单位翻转通常占绝大多数，对它的研究是首要的. 若不特别说明，通常所说的单粒子翻转就指这种单位翻转. 利用简化的线性径迹结构，采用 LET 值概念，描述离子同器件灵敏单元的相互作用是相对较简单的，能够得到一解析解 [6]. 如图 1 所示，离子的径迹结构是很复杂的，不是高斯分布或者幂分布能够准确地描述的 [7]. 这种复杂的径迹结构与假定为立方体的芯片 SV 的作用细节将更加复杂，不易用解析方法描述. 因此我们采用 Monte Carlo 方法研究此作用过程. 计算大量的离子以不同方向，入

射 SV 不同点后的平均效应，即得到一定能量的离子全向入射芯片的翻转截面 $\bar{\sigma}(E)$. 在计算中，除计算具体的离子径迹有效沉积到 SV 中的能量，及相应的产生的真正的翻转. 还考虑了芯片整体对沉积能量响应的 Weibull 函数分布 [2], 得到的结果很好地反映了真实情况. 我们选取以下 4 种器件计算 TC5117400J-6 、 2164 、 6504 RH 和 93L422, 其参数如表 1 所示. 对宇宙线中含量较多的 Fe 、 Mg 、 O 三种离子入射上述几种芯片后翻转截面随离子能量的变化进行了计算. 图 2 、 3 分别是 Fe 和 O 离子入射的情况， Mg 离子入射类似于 O, 不再列出. 从图中可以看出，低能时考虑了离子径迹结构后的翻转截面与利用 LET 计算的结果无差别，高能时考虑了径迹结构的翻转截面要小，对 SV 尺寸小、翻转阈值低的器件 (如 TC5117400J-6) 甚至小几个数量级. 这是由于总的来说，能量愈高，径迹愈宽大，有效地沉积到灵敏单元的能量愈少，引起的翻转亦愈少. 还可以看出，翻转阈值相近的芯片， SV 尺寸越小，受径迹结构影响的程度越严重，而且能量较低、径迹较小时就有明显作用. 具有较大尺寸 SV 的芯片 (如 6504 RH 和 2164), 由于 SV 尺寸较大，径迹结构的影响总的来说不大，但对于翻转阈值高的芯片，当离子能量足够高 (径迹足够大), 径迹结构也表现出明显作用. 对于 SV 尺寸更大的芯片 93L422, 即使其翻转阈值非常低，由于离子径迹宽度同 SV 横向尺寸相比是较小的，离子径迹的作用也很弱. 概而言之，离子径迹结构的作用是其有效地沉积到 SV 中的能量同翻转阈值相比较的结果. 已知离子的全向入射翻转截面，可根据下式计算其翻转率

$$R = 4\pi \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \bar{\sigma}(E)\phi(E)\mathrm{d}E, \tag{6}$$

其中 $\phi(E)$ 是离子的全向微分通量谱. 因此径迹结构对芯片翻转率的影响，最终决定于该离子的能谱分布. 利用 Creme 模式 [1], 我们计算得太阳活动低年时， Fe 、 Mg 和 O 离子的通量谱，如图 4. 可见它们的能谱是非常硬的，径迹结构的影响不容忽视. 利用 (6) 式计算的 4 种芯片的翻转率如表 2. 可以看到考虑了径迹结构后的翻转率普遍低于 LET 方

表 1　器件参数 *

器　件	$\sigma_0(\mu m^2)$	E_0 (MeV)	W (MeV)	S	$h(\mu m)$	文献
93L422	2600	0.28	2.04	0.7	2.0	[2,9]
6504RH	170	14.27	18.57	1.4	2.0	[2,9]
2164	170	0.45	4.59	1.42	3.0	[9]
TC5117400J-6	9.6	0.32	9.00	0.8	1.0	[2]

*σ_0: 饱和截面， E_0: 翻转阈值， W: 分布宽度， S: 形状因子， h: SV 厚度

表 2　利用 LET 及离子径迹结构计算的器件的翻转率 ($bit^{-1}\cdot day^{-1}$)

器　件		93L422	6504RH	2164	TC5117400J-6
Fe^+	LET	3.94×10^{-4}	8.34×10^{-8}	1.73×10^{-5}	3.22×10^{-7}
	TRACK	3.85×10^{-4}	2.88×10^{-8}	1.57×10^{-5}	5.38×10^{-9}
Mg^+	LET	1.90×10^{-4}	0.0	3.98×10^{-6}	6.07×10^{-8}
	TRACK	1.72×10^{-4}	0.0	3.41×10^{-6}	3.65×10^{-9}
O^+	LET	3.30×10^{-4}	0.0	3.62×10^{-6}	2.97×10^{-8}
	TRACK	3.17×10^{-4}	0.0	3.04×10^{-6}	0.0

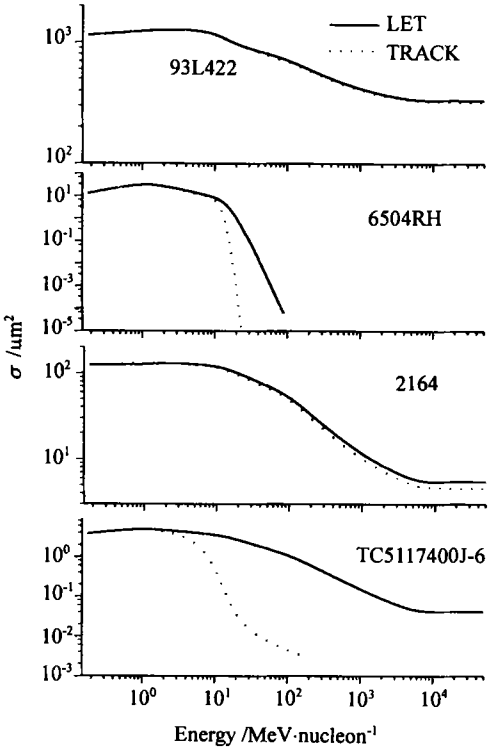

图 2 器件对 Fe 离子的翻转截面

Fig.2 Upset cross sections induced by Fe ion

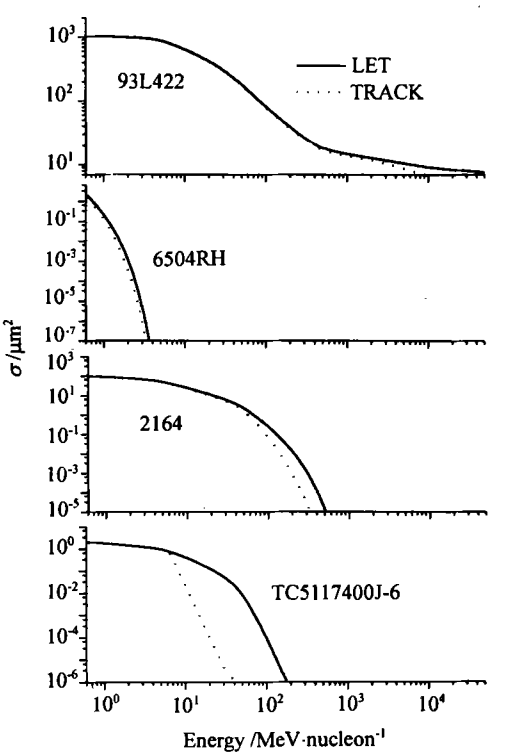

图 3 器件对 O 离子的翻转截面

Fig.3 Upset cross sections induced by O ion

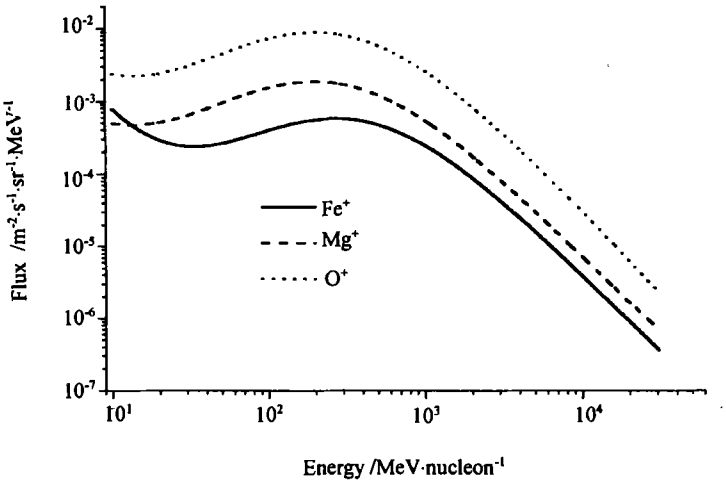

图 4 太阳活动低年时银河宇宙线中 Fe 、 Mg 和 O 三种离子通量谱

Fig.4 Flux of Fe, Mg and O ions in GCR with minimum solar activity

法计算的结果，对小尺寸 SV 、低翻转阈值的芯片，影响极大，对较大尺寸 SV 和较高翻转阈值的芯片，影响也较明显.

3　离子径迹结构造成的多位翻转

进一步，我们考虑相邻的多个 SV 由于离子掠入射或者宽大的径迹同时穿过的情形，计算多位翻转效应. 计算中假设 4 种芯片 SV 的间距均为 2 μm. 计算表明，3 种离子入射四种芯片都会造成一定程度的多位翻转. 芯片翻转阈值越低，越容易造成多位翻转，这是很自然的. 同样间距的假设下， SV 尺寸越大，多位翻转现象越明显. 这是由于较大的尺寸有利于具有一定横向尺寸的离子径迹在相邻的多个单元同时沉积足够能量. 器件 93L422 具有最小的翻转阈值和最大的 SV 尺寸，因此多位翻转最明显，如图 5(图中 MBU1 、 MBU2$\cdots$ 分别代表一位、两位翻转等). 可以看到，当离子能量小于 5 MeV·nucleon^{-1}, 其径迹直径小于假定的器件 SV 间距时，仍有相当数量的多位翻转. 此时的多位翻转与离子横向径迹无关，是其纵向穿透多个 SV 造成的. 对于高能离子，多位翻转则是离子横向和纵向共同作用的结果. 图 5 表明，高位翻转截面随能量升高于几十 MeV·nucleon^{-1} 处表现出极值，更高能量的离子并不能引起更多的多位翻转. 如图 6, 离子的径迹半径随能量增加急剧增大，而 LET 值先是随能量升高而升高，在几 MeV·nucleon^{-1} 附近达到极值，随后随能量降低很快减小. 即高能离子虽然径迹宽大，但其能量密度稀疏，并不能有效地引起翻转. 我们的计算还表明，并不是像以前人们想象的那样，芯片集成度越高，即灵敏单元尺寸越小，越容易造成多位翻转 [8]. 造成多位翻转，也需要一定的芯片灵敏单元尺寸. 进一步估算了太阳活动低年时， Fe 、 Mg 、 O 三种离子造成的器件 93L422 多位翻转率，如表 3. 可见翻转率随位数增多呈数量级降低. 虽然多位翻转在数量上是少数的，由于现行的芯片查错-纠错方法对单位翻转即可查错也可纠错，对多位翻转只能发现错误，不易纠正 [8], 因此其一旦发生危害更大，必须引起重视.

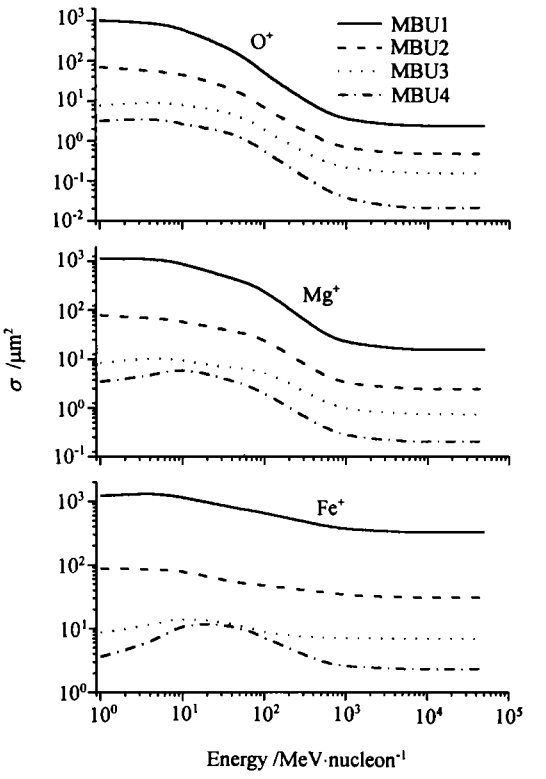

图 5　高能重离子入射器件 93L422 造成的多位翻转

Fig.5　Multiple-bit upsets induced by high-energy heavy ions for device 93L422

表 3　重离子造成的器件 93L422 的多位翻转率 (bit^{-1}·day^{-1})

多位翻转率	MBU1	MBU2	MBU3	MBU4
Fe^+	3.85×10^{-4}	3.01×10^{-5}	6.04×10^{-6}	2.90×10^{-6}
Mg^+	1.72×10^{-4}	1.86×10^{-5}	4.54×10^{-6}	1.56×10^{-6}
O^+	3.17×10^{-4}	2.50×10^{-5}	6.40×10^{-6}	1.75×10^{-6}

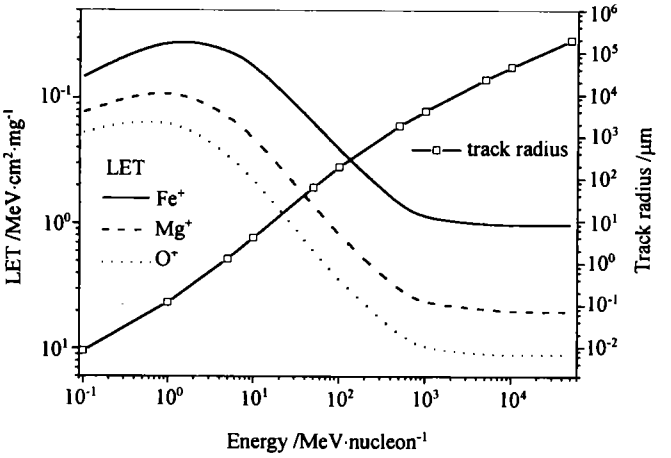

图 6 重离子 LET 及径迹半径随能量的变化

Fig.6 LET value and track radius as a function of heavy ions' energy

4 结 论

本文研究了高能重离子以一定的径迹结构与器件芯片灵敏单元相互作用的过程. 径迹结构首先对单位翻转有影响, 即单位翻转并没有利用线性 LET 概念描述得那么高, 对低翻转阈值、小灵敏单元的芯片更是低几个数量级. 径迹结构还造成显著的多位翻转, 用 LET 概念是不能反映此种效应的. 对于翻转阈值较低, 芯片灵敏单元间距较小, 灵敏单元尺寸较大的芯片多位翻转更突出. 航天器在飞行中遭遇的重离子, 能量通常是很高的, 这种径迹结构的影响是不应回避的. 尤其是随着微电子芯片集成度越来越高, 灵敏单元尺寸和间距越来越小, 翻转阈值越来越低, 离子径迹结构对单粒子翻转的影响势必更加突出, 必须引起我们的足够重视.

参 考 文 献

[1] Adams J H Jr, Silberberg R, Tsao C H. Cosmic ray effects on microelectronics. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1982, **29**(1):169—171

[2] Pickel J C. Single-event effects rate prediction. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1996, **43**(2):483—495

[3] Robert K *et al.* An analytical presentation of the radial distribution of dose from energetic heavy ions in water, Si, LiF, NaI and SiO_2. *Rad. Eff.*, 1990, **114**:15—20

[4] Tabata T, Ito R, Okabe S. Generalized semiempirical equations for the extrapolated range of electrons. *Nucl. Instr. Meth.*, 1972, **103**:85—91

[5] Hamm R N, Turner J E, Wright H A, Ritchie R H. Heavy ion track structure in silicon. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1979, **26**:4 892—4 897

[6] Connell L W *et al.* Modeling the heavy ion upset cross section. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1995, **42**(2):73—82

[7] Dussault H *et al.* Numerical simulation of heavy ion charge generation and collection dynamics. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1993, **40**(6):1 926—1 934

[8] Dodd P E, Sexton F W, Winokur P S. Three-dimensional simulation of charge collection and multiple-bit upset in Si devices. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1994, **41**(6):2 005—2 017

[9] Peterson E L *et al.* Geometrical factors in see rate calculations. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1993, **40**(6):1 888—1 909

EFFECTS OF TRACK STRUCTURE OF HIGH-ENERGY HEAVY IONS ON SINGLE EVENT UPSET

HAN Jianwei

(*Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

Abstract

The track structure of high-energy heavy ions was calculated in this paper and using Monte Carlo method, effects of the track structure on single event upset was studied. Taking into account the track structure, devices with small sensitive cell and low upset threshold show lower upset cross sections and upset rates, when compared with LET calculation. When ion becomes heavier, this decrease is remarkable even for devices with moderate dimension sensitive cell and higher upset threshold. In general, ion track shows effect when effective deposited energy is comparable with upset threshold. High-energy heavy ions can penetrate into thick material, in addition large dimensional track has chance to deposit enough energy in neighboring cells simultaneously. Both of these two cases can give rise to multiple-bit upsets. And this multiple-bit upsets effect can't be calculated with LET.

Key words High-energy heavy ions, Track structure, Single event upset, Multiple-bit upsets