

文章编号: 1007-4627(2003)01-0066-04

## 用重离子实验数据推算质子翻转截面和轨道翻转率\*

张庆祥, 侯明东, 刘 杰

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 空间单粒子辐射环境主要由重离子和高能质子构成, 但在地面利用两种离子评估器件单粒子效应敏感度成本太高, 因此利用重离子实验数据推算质子敏感参数成为一个非常活跃的研究课题. 利用 Barak 经验公式, 在重离子实验获得器件的  $\sigma$ -LET 值曲线的基础上, 计算了几种典型器件在不同能量下的质子翻转截面以及典型轨道上质子引起的翻转率, 并同 FOM 方法预示的质子翻转率进行了比较, 其结果将对卫星电子系统抗辐射加固设计具有重要参考价值.

**关键词:** 单粒子效应;  $\sigma$ -LET 值曲线; 质子翻转截面; 轨道翻转率

**中图分类号:** P354.2      **文献标识码:** A

### 1 引言

空间的单粒子辐射环境主要由重离子和高能质子构成, 因此完整评价器件的单粒子效应(SEE)敏感度需要用重离子和高能质子两种离子. 但是由于经费以及其它方面的原因, 设计人员需要经常面对的状况是只获得了一种离子的实验数据. 研究人员一直在致力于找到一种模型在重离子数据和质子数据之间互相推算. 从质子数据推算重离子敏感参数尚未被广泛接受, 研究最多的是基于重离子实验数据推算质子翻转截面( $\sigma$ )以及轨道翻转率<sup>[1]</sup>.

质子引起单粒子翻转(SEU)的过程可以分为两个阶段<sup>[2]</sup>: (1)能量沉积阶段, 质子与硅核反应的产物在敏感体积中沉积能量; (2)电路反应阶段, 即电子器件对沉积能量的响应. 质子和重离子引起 SEE 的差别主要在能量沉积阶段. 重离子通过直接电离, 而高能质子通过核反应机制. 电路对沉积在敏感区中能量的反应取决于电路自身的特性, 无论是用重离子获得的  $\sigma$ -LET(线性能量传输)曲线还是用高能质子实验得到的  $\sigma$ -E(能量)曲线都反映了电路的这种特性, 这也是二者实验数据相互推导的重要依据. 高能质子在敏感体积中沉积的能量可以通过理论计算和实验两种方法得到, 虽然在实验数据的

积累方面取得了一定的进展, 但是进展缓慢, 而且不全面. 在理论计算中有代表性的是蒙特卡罗方法, 而蒙特卡罗方法中大多数使用核子级联模型<sup>[3]</sup>, 但该模型仅在 100 MeV 以上成立. 为此, 在著名的 CUPID 模型中, 加入了一些限制条件, 使得蒙特卡罗方法在 100 MeV 以下也可应用. Takami 等<sup>[4]</sup>利用光学模型和统计蒸发模型来分析 100 MeV 的反应产物, 先用光学模型得到总的反应截面, 再用蒙特卡罗方法得到反冲能量谱. 预计这种方法计算的精度将随着核反应理论的发展而提高. 但由于涉及核反应理论, 某些参数的调节非常困难, 因此这些方法并没有得到广泛的应用. 高能质子在面垒型探测器中的沉积能量最初被用来验证以上这些模型. McNulty 等<sup>[5]</sup>最早提出利用该能谱来计算质子翻转截面. 而 Barak 等<sup>[6]</sup>在更加完备的能谱实验数据的基础上, 利用敏感区厚度与器件相当的探测器中的沉积能量谱来近似高能质子在敏感区中的能量沉积谱, 然后结合重离子数据, 直接推出质子翻转截面和轨道翻转率. 该方法具有良好的实用性. 本文利用 Barak 最近提出的经验公式来估算从 2 k×8 到 512 k×8 几种典型静态存储器(SRAM)的质子翻转截面和轨道翻转率.

\* 收稿日期: 2002 - 03 - 21; 修改日期: 2003 - 01 - 08

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19775058, 10075064)

作者简介: 张庆祥(1971-), 男(汉族), 甘肃通渭人, 博士, 从事半导体器件辐射效应研究.

## 2 $\sigma$ -LET 值曲线以及 Weibull 拟合参数的获得

我国从 20 世纪 90 年代初开展 SEE 实验研究以来，利用国内的重离子加速器积累了一批重离子 SEE 的应实验数据。但由于到目前为止，质子 SEE 的实验数据相对缺乏。重离子实验数据通常以  $\sigma$ -LET 值曲线的形式来表示，而  $\sigma$ -LET 值曲线可以用 Weibull 函数来描述，实验获得的几种器件的 Weibull 函数的拟合参数如表 1 所示。表中 IDT71256 的数据是利用在兰州重离子加速器 (HIRFL)SSC 加速的 1.6 GeV 的  $^{20}\text{Ne}$ ，1.26 GeV 的  $^{36}\text{Ar}$ ，2.1 GeV 的  $^{136}\text{Xe}$  以及 SFC 加速的 130

MeV 的  $^{40}\text{Ar}$  离子先后通过四次实验获得的，如图 1 所示，其中  $^{136}\text{Xe}$  也是 HIRFL 迄今为止加速的最重的离子。HM628128 以及 HM628512 的数据是利用北京串列静电加速器(HI-13)加速的 46.8 MeV 的  $^{19}\text{F}$ ，113 MeV 的  $^{35}\text{Cl}$  以及 133.7 MeV 的  $^{79}\text{Br}$  离子获得<sup>[7]</sup>。表 1 中同时给出了根据式 (1) 得到的  $\alpha_{\text{FOM}}$  参数<sup>[8]</sup>：

$$\alpha_{\text{FOM}} = \frac{\sigma_{\text{HL}}}{L_{0.25}^2} (\text{MeV} \cdot \text{mg}^{-1}), \quad (1)$$

其中  $L_{0.25}$  由下式得到：

$$L_{0.25} = L_0 + W \times 0.288^{1/S}. \quad (2)$$

表 1 SRAM 的 Weibull 拟合参数

器件型号	容量	$\sigma_{\text{HL}}/\text{cm}^2$	$L_0/(\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1})$	$W/(\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1})$	S	FOM
HM6116	2 k×8	0.03	4	14.29	1.1	$4.56 \times 10^{-4}$
HM65162	2 k×8	0.03	1.18	22.7	1.61	$1.98 \times 10^{-4}$
IDT7164	2 k×8	0.1	4	33.33	2	$2.09 \times 10^{-4}$
IDT71256	32 k×8	0.055	4.2	34.3	1.6	$1.38 \times 10^{-4}$
HM628128	128 k×8	0.075	1	16.67	1.4	$1.22 \times 10^{-3}$
HM628512	512 k×8	0.5	1.2	33.8	0.92	$5.08 \times 10^{-3}$

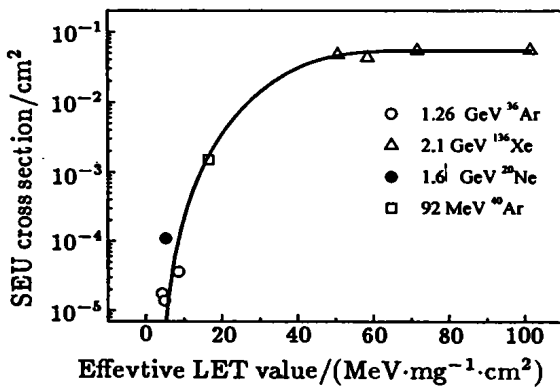


图 1 IDT71256 的  $\sigma$ -LET 值曲线

## 3 Barak 经验公式<sup>[2, 6]</sup>

50—300 MeV 的高能质子轰击灵敏区厚度为 2—100  $\mu\text{m}$  的 EG&G Ortec D 及 X 系列的全耗尽面垒型探测器，获得的能量沉积谱具有指数衰减的形式，即：

$$g(E_p, d, \epsilon) = \beta e^{-\beta}, \quad (3)$$

其中  $\beta$  是一个与入射质子能量  $E_p$ 、灵敏区厚度  $d$  有关的常数。为了与重离子实验得到的  $\sigma$ -LET 值曲线一致，将上式中的沉积能量  $\epsilon$  用  $L = \epsilon/\rho d$  代替，其中  $L$  是反冲核的有效 LET 值， $\rho$  是硅的密度。一般而言，器件的敏感区厚度大约为 2  $\mu\text{m}$ ，若取  $d$  为 2  $\mu\text{m}$ ，式 (3) 可以写成：

$$g(E_p, L) = \delta(E_p) e^{-\delta(E_p) L}, \quad (4)$$

其中  $\delta(E_p) = 0.134 + 9/E_p$ ，单位是  $(\text{MeV}/\text{mg}/\text{cm}^2)^{-1}$ ， $E_p$  的单位是 MeV。当能量为  $E_p$  时，质子翻转截面为

$$\sigma_p(E_p) = 2.4 \times 10^{-6} \int_0^{\infty} g(E_p, L) \sigma(L) dL, \quad (5)$$

其中  $\sigma(L)$  是器件的  $\sigma$ -LET 值曲线的 Weibull 函数表达式：

$$\sigma(L) = \sigma_{\text{HL}} \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{L - L_0}{W} \right)^S \right] \right\} \quad (6)$$

质子在特定轨道的翻转率为

$$R_p = \int_0^{\infty} f_p(L) \sigma(L) dL, \quad (7)$$

其中  $f_p(L)$  是该轨道的有效 LET 值微分离子强度:

$$f_p(L) = 2.4 \times 10^{-6} \int_0^{\infty} g(E_p, L) f(E_p) dE_p, \quad (8)$$

$f_p(L)$  对某一特定轨道上的所有器件而言是一样的. 计算表明, 对于 3 000 km 以下的圆轨道,  $f_p(L)$  近似为

$$f_p(L) = f_0 \exp(-0.2L), \quad (9)$$

$f_0$  是正比于轨道积分离子强度的常数. 对于 800 km 的极地轨道, 太阳极大情形, 并考虑 1 mm Al 屏蔽,  $f_0 = 2.5$ .

### 4 质子翻转截面及轨道翻转率的推算

利用式(3)计算的几种器件的质子翻转截面与能量的关系如图 2 所示, 能量范围从 20 MeV 到 300 MeV. 从图中可以看出, 在 30 MeV 到 100 MeV 之间, 几种 SRAM 的截面变化很大, 在 100 MeV 以上变化区域缓慢, 因此研究质子 SEE 时, 质子能量至少要在 100 MeV 以上. 在表 2 中, 将用

Barak 公式计算的饱和截面与 FOM 公式以及 Larry 公式计算的结果进行了比较<sup>[9, 10]</sup>. 其中利用  $\alpha_{FOM}$  参数计算质子饱和截面的公式为

$$\sigma_{PL} = \frac{\alpha_{FOM}}{4.5 \times 10^4}. \quad (10)$$

从表中可以看出, Barak 公式与 FOM 方法计算的结果比较接近, 而 Larry 公式给出的是饱和截面的上限.

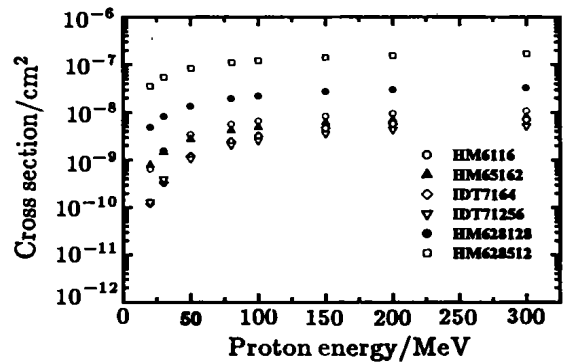


图 2 利用 Barak 经验公式计算静态存储器质子翻转截面

表 2 3 种方法计算的质子饱和截面的比较

器件类型	HM6116	HM65162	IDT7164	IDT71256	HM628128	HM628512
Barak 方法	$1.06 \times 10^{-8}$	$7.89 \times 10^{-9}$	$7.05 \times 10^{-9}$	$5.14 \times 10^{-9}$	$3.25 \times 10^{-8}$	$1.67 \times 10^{-7}$
FOM 方法	$1.01 \times 10^{-8}$	$4.4 \times 10^{-9}$	$4.64 \times 10^{-9}$	$3.06 \times 10^{-9}$	$2.7 \times 10^{-8}$	$1.13 \times 10^{-7}$
Larry 公式	$1.38 \times 10^{-8}$	$1.37 \times 10^{-8}$	$2.33 \times 10^{-8}$	$1.4 \times 10^{-8}$	$5.58 \times 10^{-8}$	$2.44 \times 10^{-7}$

用 Barak 经验公式推算的几种 SRAM 在 800 km 极地轨道的翻转率如表 3 所示, 同时给出了利用 FOM 方法计算的质子翻转率 ( $R = 120 \times \alpha_{FOM}$ ). 可以看出两种方法的预示结果也非常接近.

表 3 利用 Barak 经验公式和 FOM 方法计算的几种 SRAM 的翻转率的计算值\* 日<sup>-1</sup>

器件型号	Barak 公式	FOM 方法
HM6116	$4.37 \times 10^{-2}$	$5.80 \times 10^{-2}$
HM65162	$3.47 \times 10^{-2}$	$2.53 \times 10^{-2}$
IDT7164	$2.55 \times 10^{-2}$	$2.65 \times 10^{-2}$
IDT71256	$5.82 \times 10^{-3}$	$7.27 \times 10^{-3}$
HM628128	$1.51 \times 10^{-1}$	$1.19 \times 10^{-1}$
HM628512	$9.03 \times 10^{-1}$	$6.13 \times 10^{-1}$

\* 800 km 极地轨道; 1 mm Al 屏蔽, 太阳宁静期.

### 5 结论

质子翻转截面及轨道翻转率对于航天器电子系统的抗辐射加固设计具有重要的参考价值. 我们利用 HIRFL 加速的重离子积累了一批重离子单粒子效应的实验数据<sup>[11-13]</sup>, 在国内目前尚不具备高能质子加速器和质子 SEE 数据非常缺乏的情况下, 借鉴国外现有的模型, 逐步加以改进, 最终建立自己的利用现有的重离子实验数据推算质子翻转截面和轨道翻转率的模型, 就显得尤为重要. 本工作在这方面进行了有益的探索.

## 参 考 文 献:

- [1] Edmonds L D. Proton SEU Cross Sections Derived from Heavy-ion Test Data[J]. IEEE Trans Nucl Sci. 2000, 47(6): 1 713.
- [2] Barak J. Empirical Modeling of Proton Induced SEU Rates [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2000, 47(3): 545.
- [3] Petersen E L. Approaches to Proton Single-event Rate Calculations[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, 43(2): 496.
- [4] Takani Y, Shiraishi F, Gaka T. Investigation of Single Event Upset Subject to Proton of Intermediate Energy Range[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1990, 37(6): 1 953.
- [5] McNulty P J, Farrell G E, Tucker W P. Proton-induced Nuclear Reactions in Silicon[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1981, 28(6): 4 007.
- [6] Barak J, Levinson J, Alkerman A, *et al.* A Simple Model for Calculating Proton Induced SEU [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, 43(3): 979.
- [7] 张庆祥, 杨兆铭. 同一字节多位翻转实验研究[J]. 原子能科学技术, 2001, 35(6): 485.
- [8] Petersen E L. The SEU Figure of Merit and Proton Upset Rate Calculations[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1998, 45(6): 2 550.
- [9] Barak J, Reed R A, Label K A. On the Figure of Merit Model for SEU Rate Calculations[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1999, 46(6): 1 504.
- [10] Edmonds L D. Proton SEU Cross Sections Derived from Heavy-ion Test Data [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2000, 47(6): 1 713.
- [11] 侯明东, 甄红楼, 张庆祥等. 重离子在半导体器件中引起的单粒子效应[J]. 原子核物理评论, 2000, 17(3): 165.
- [12] 张庆祥, 侯明东, 甄红楼等. 用<sup>12</sup>C离子模拟质子引起的单粒子效应[J]. 原子核物理评论, 2001, 18(3): 169.
- [13] 张庆祥, 杨兆铭. 微处理器 80C86 及其外围芯片协合效应实验研究[J]. 原子核物理评论, 2002, 19(1): 70.

## Proton SEU Cross Sections and Rates Derived from Heavy-ion Test Data\*

ZHANG Qing-xiang, HOU Ming-dong, LIU Jie

(Modern Institute of Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The radiation environments concerned with single event upset mainly consist of heavy ions from cosmic ray and large flux proton from solar events and planetary radiation belts. The most reliable calculation for SEE rate induced by proton and heavy ions are the way to use the experimentally measured data respectively. But it is too expensive to test devices with both heavy ions and protons. So it is necessary to derive models for predicting proton cross-sections and rates from heavy-ion test data. At first the heavy-ion test data of four kinds of SRAM is introduced and fitted by Weibull function. Then by using newly reported Barak empirical formula, the proton cross sections at different energies and proton SEU rates on typical orbit are predicted. And the latter are also compared with that predicted by using FOM method. The predicted proton SEE rates have important application in radiation-hardened design of space electronics system.

**Key words:** single event effect;  $\sigma$ -LET curve; proton upset; cross-section orbital upset rate

\* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(19775058, 10075064)