

文章编号: 2095-4980(2017)01-0145-04

纳米器件质子在轨单粒子翻转率预计方法

于庆奎, 罗 磊, 唐 民, 孙 毅, 魏志超, 李 铮

(中国空间技术研究院 宇航物资保障事业部, 北京 100029)

摘 要: 研究了纳米器件在空间轨道中质子引起单粒子翻转(SEU)率的预计方法。以 65 nm SRAM 为样品, 利用加速器进行了质子和重离子单粒子翻转试验, 分别基于质子试验数据和重离子试验数据, 预计了空间轨道中质子引起的单粒子翻转率。结果表明, 用重离子试验数据预计的质子单粒子翻转率比用质子试验数据预计的低 1.5 个数量级。研究认为, 为了评估纳米器件单粒子翻转敏感性, 需进行质子单粒子翻转试验, 并基于质子试验数据进行在轨质子翻转率预计。

关键词: 辐射效应; 纳米器件; 质子; 重离子; 单粒子翻转

中图分类号: TN99; O572.11

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201701.0145

SEU rate calculation for nano device proton on orbit based on protons and heavy ions experimental data

YU Qingkui, LUO Lei, TANG Min, SUN Yi, WEI Zhichao, LI Zheng

(Astronautical Material Support Department, China Academy of Space Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The methods of Single-Event Upset(SEU) rates calculation induced by protons on orbits are studied on nano device. The SEUs of 65 nm SRAM are tested by using heavy ions and protons generated by accelerator. The SEU rates induced by protons on orbit are calculated based on heavy ion and proton experimental data respectively. It is shown that the proton SEU rate obtained by heavy ion experimental data is 1.5 order of magnitude lower than that obtained by proton experimental data. The conclusion is that proton SEU test should be performed for nano device to evaluate its SEU sensitivity; and the proton SEU rate should be calculated based on the proton experimental data.

Keywords: radiation effect; nano device; proton; heavy ion; Single-Event Upset(SEU)

空间辐射环境中, 90%以上辐射粒子为质子。空间质子的线性能量传输(Linear Energy Transfer, LET)值最大可达 $0.5 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$, 质子与硅核反应产物的 LET 值可达 $15 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 。纳米器件趋向于单粒子效应敏感, 已有的试验数据表明, 纳米器件的单粒子翻转 LET 阈值可能低于 $0.5 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ ^[1], 空间质子直接电离和核反应产物均可引起单粒子翻转^[1-3]。对于纳米器件, 质子引起单粒子翻转率可能超过重离子引起的^[4]。因此, 需要进行纳米器件质子单粒子翻转敏感性评估, 为纳米器件设计加固和应用加固提供基础数据。单粒子翻转阈值低于 $15 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 的器件, 不仅要考虑空间重离子引起的单粒子翻转, 还要考虑质子引起的单粒子翻转。

针对质子单粒子效应评估需要, 建立了根据地面质子试验数据预计空间质子单粒子翻转率的方法^[5-8]。考虑到地面质子单粒子试验数据少, 重离子单粒子试验数据相对容易获得, 提出了基于地面重离子单粒子试验数据预计质子单粒子翻转率的方法, 即重离子试验数据外推法。

为了准确评估纳米器件质子单粒子效应, 以 65 nm SRAM 为对象, 利用高能粒子加速器, 分别进行了质子单粒子翻转试验和重离子单粒子翻转试验, 根据质子单粒子试验数据和重离子单粒子试验数据, 进行了空间质子引起的单粒子翻转率预计, 分析比较了利用不同预计方法预计纳米器件的质子单粒子翻转率, 分析结果对开展纳米器件质子单粒子翻转率预计有参考作用。

收稿日期: 2015-07-17; 修回日期: 2015-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11475256)

1 空间质子引起的单粒子翻转率预计方法

航天器内部质子为连续能谱。对于核反应引起的单粒子翻转, 通过空间质子微分能谱和器件单粒子翻转截面进行积分, 可获得空间连续谱质子产生的单粒子翻转率:

$$R_p = \int_{E_0}^{E_{\max}} \Phi(E) \sigma(E) dE \quad (1)$$

式中: R_p 为质子单粒子翻转率($\text{d}^{-1} \cdot \text{bit}^{-1}$); $\Phi(E)$ 为质子微分能谱($\text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{MeV}^{-1}$); $\sigma(E)$ 为单粒子翻转截面($\text{cm}^2 \cdot \text{bit}^{-1}$); E 为质子能量(MeV); E_0 为引起单粒子翻转的最小质子能量阈值(MeV); $E_{\max}$ 为空间质子最大能量(MeV)。

单粒子翻转截面 $\sigma(E)$ 与质子的能量有关。进行质子引起单粒子翻转率预计, 需要获得单粒子翻转截面 $\sigma(E)$ 与质子能量的函数关系。质子单粒子翻转截面与质子能量的函数关系可通过 2 种方式获得: 通过地面质子单粒子试验获得, 或者通过地面重离子试验数据外推获得。下面分别介绍。

1) 威布尔方程拟合

在加速器上进行质子单粒子试验, 通常在不少于 5 个质子能量点下进行试验, 获得不同能量下的翻转截面, 利用威布尔方程拟合获得翻转截面与质子能量函数关系。威布尔方程为:

$$y = A(1 - e^{-(k(x - X_c))^d}) \quad (2)$$

式中: y 为翻转截面; A 代表饱和翻转截面 σ_s ; X_c 为引起翻转的最小质子能量; k 和 d 为曲线形状参数。

2) Bendel 参数法

Bendel 和 Petersen 在核反应能谱学的基础上, 提出了描述质子单粒子翻转截面与质子能量关系的 Bendel 模型。Bendel 模型双参数模型公式为:

$$\sigma_p(E) = \sigma_p(\infty)[1 - \exp(-0.18Y^{0.5})]^4, Y = (18/A)^{0.5(E-A)} \quad (3)$$

式中: σ_p 为质子单粒子翻转截面; E 为质子能量(MeV); A 为引起单粒子翻转所需的最小质子能量(MeV); $\sigma_p(\infty)$ 为质子能量 ∞ 时单粒子翻转截面(极限截面)。

在加速器上进行质子单粒子试验, 对式(3)进行求解得到所需的参数。

质子核反应产物的单粒子效应与重离子单粒子效应具有相同的特性。A. Rollins 给出了一个经验公式来描述质子单粒子翻转极限截面 $\sigma_p(\infty)$ 和重离子单粒子翻转饱和截面 σ_h 、器件灵敏区厚度 t 及重离子 LET 阈值 L_0 ($\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$) 之间的关系。

$$\sigma_p(\infty) / \sigma_h \cdot t = 1.27 \times 10^{-5} \exp(-0.383L_0^{1.41}) \quad (4)$$

通过测量重离子单粒子翻转截面, 得到 LET 阈值 L_0 。根据器件灵敏区的厚度 t , 可求得质子单粒子翻转的极限截面 $\sigma_p(\infty)$ 。C. Petersen 提出了一个简单的由重离子单粒子翻转阈值推算质子单粒子翻转阈值的公式:

$$A = L_0 + 15 \quad (5)$$

由此, 通过重离子单粒子效应数据, 可推算得到 Bendel 公式中的参数 $\sigma_p(\infty)$ 和参数 A 。

2 器件重离子和质子单粒子试验数据

试验样品为 65 nm CMOS 工艺制造的 SRAM。试验前, 试验样品开帽。重离子试验在中科院兰州近代物理所回旋加速器和中国原子能院串行加速器上进行。质子试验在瑞士圣保罗实验室(Paul Scherrer Institut, PSI)回旋加速器和北京大学串行加速器上进行。所有试验均在室温下进行。

65 nm SRAM 重离子单粒子试验结果见图 1, 质子单粒子试验结果见图 2。图中黑点为试验数据, 曲线为采用威布尔方程得到的拟合曲线。

3 在轨质子单粒子翻转率预计及比较

采用中国空间技术研究院组织开发的空辐射效应分析软件 ForeCast 进行在轨单粒子翻转率预计。

计算了低地球轨道(400 km×400 km, 43°)质子单粒子翻转率。辐射环境为太阳活动最小情况。辐射带质子模型选择 AP8。航天器屏蔽厚度取 3 mm 铝。

分别基于质子试验数据和重离子试验数据，计算器件在空间轨道中因质子引起的单粒子翻转率。65 nm 存储器在轨质子单粒子翻转率预计结果见表 1。

从表 1 可看出，采用重离子外推法计算出的质子单粒子翻转率，比根据质子试验数据获得的单粒子翻转率预计结果低约 1.5 个数量级。

重离子外推法是在核反应的基础上建立的，对于纳米器件，质子直接电离也可引起单粒子翻转。

我国比较关注重离子引起的单粒子翻转，由于缺乏合适的质子加速器，质子单粒子效应评估严重不足。从前面的比较结果可得出，对于纳米器件，如果仅用重离子试验数据评估纳米器件单粒子效应，将低估器件在轨的单粒子翻转率，对于纳米器件，不仅需要进行重离子单粒子试验，还需要进行质子单粒子效应试验评估，并根据质子试验数据进行在轨单粒子翻转率预计。

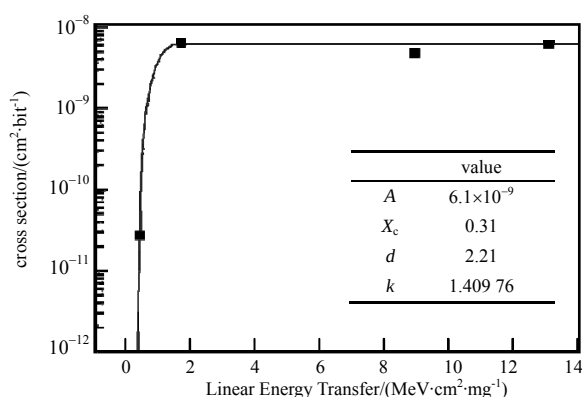


Fig.1 SEU cross-section of 65 nm SRAM vs. incident heavy ion LET
图 1 65 nm SRAM 翻转截面随入射重离子 LET 值变化

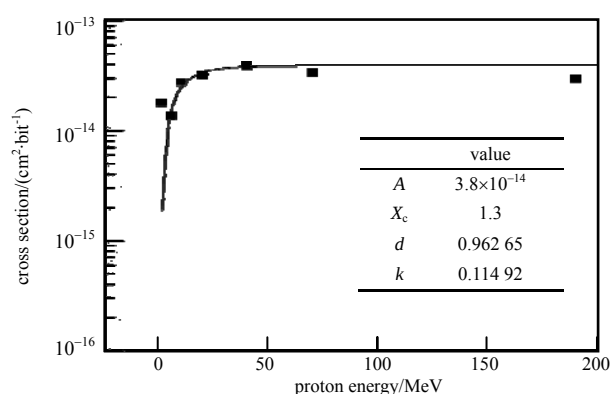


Fig.2 SEU cross-section of 65 nm SRAM vs. proton energy
图 2 65 nm SRAM 翻转截面随入射质子能量变化

表 1 65 nm SRAM 在轨质子单粒子翻转率预计结果

Table1 SEU rates of 65 nm SRAM induced by protons

based on protons experimental data/(bit ⁻¹ ·d ⁻¹)	based on heavy ions experimental data/(bit ⁻¹ ·d ⁻¹)
5.28×10 ⁻⁸	1.39×10 ⁻⁹

4 结论

对于纳米器件等先进工艺器件，质子引起的单粒子翻转率可能超过重离子引起的单粒子翻转率，如果仅用重离子试验数据评估其单粒子效应，无法准确评估器件质子单粒子翻转率，需进行质子单粒子效应试验。

参考文献：

- [1] CANNON E H, CABANAS-HOLMENT M, WERT J, et al. Heavy ion, high-energy, and low-energy proton SEE sensitivity of 90-nm RHBD SRAMs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(6):3493–3499.
- [2] SIERAWSKI B D, PELLISH J A, REED R A, et al. Impact of low-energy proton induced upsets on test methods and rate predictions[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, 56(6):3085–3092.
- [3] ARTOLA Laurent, VELAZCO Raoul, HUBERT Guillaume, et al. In flight SEU/MCU sensitivity of commercial nanometric SRAMs: operational estimation[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011, 58(6):2644–2651.
- [4] HUBERT G, BOURDARIE S, ARTOLA L, et al. Impact of the solar flares on the SER dynamics on micro and nanometric technologies[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(6):3127–3134.
- [5] SCHWANK J R, SHANEYFELT M R, DODD P E. Radiation hardness assurance testing of microelectronic devices and integrated circuits: test guideline for proton and heavy ion single event effects[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(3):2101–2118.
- [6] SCHWANK R, SHANEYFELT M R, DODD P E, et al. Hardness assurance test guideline for qualifying devices for use in proton environment[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, 56(4):2171–2177.
- [7] European Space Agency(ESA). Space Product Assurance: Radiation Hardness Assurance: ESA-TEC-QE/2009/22 Issue 1[OL]. [2015-07-17]. <https://escies.org/webdocument/showArticle?id=167>.

(下转第 158 页)