

文章编号: 1001-2486(2002)02-0011-03

宇宙高能质子致单粒子翻转率的计算*

王同权, 戴宏毅, 沈永平, 张若棋, 肖亚斌

(国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 通过简化半导体器件灵敏单元, 计算得到了宇宙高能质子在器件灵敏单元内产生的能量沉积。然后利用地面重离子实验单粒子翻转数据得到的 Weibull 函数, 计算了 CRRES 卫星轨道、33mm 铝屏蔽壳体内几种器件的单粒子翻转率, 并与已有结果进行了比较说明。

关键词: 高能质子; 空间辐射; 单粒子翻转; 卫星

中图分类号: P353.4 **文献标识码:** A

Calculation of Cosmic High Energy Proton Induced Single Event Upset Rate

WANG Tong-quan, DAI Hong-yi, SHEN Yong-ping, ZHANG Ruo-qi, XIAO Ya-bin

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: By simplifying the sensible volume of semiconductor devices, the energy deposited by the cosmic high-energy protons in the sensible volume of semiconductor devices is calculated. Then by using the Weibull function derived by the ground heavy ion SEU experiments, the SEU rates of several devices by the shielding of 33 mm Aluminum in the CRRRES satellite orbit are calculated. The results are compared and analyzed.

Key words: high energy proton; space radiation; SEU (single event upset); satellite

随着航天器上半导体元器件集成度的不断提高, 器件的特征尺寸越来越小, 宇宙空间粒子辐射导致的单粒子效应也越来越严重, 成为影响航天器可靠性和寿命的主要因素^[1, 2]。单粒子翻转 (single event upset, SEU) 是比较常见的一类辐射效应。我国于 1995 年 2 月 8 日发射升空的“实践四号”卫星上搭载的两台用于单粒子事件测量的监测装置, 在入轨后的 19 天内共发生了 65 次翻转, 而“风云一号(B)”气象卫星也因多次 SEU 事件导致姿态控制系统失控而过早的失效^[3]。因此 SEU 效应的研究引起了人们的高度重视, 单粒子翻转截面的估算就是其中一项重要的工作。在宇宙空间辐射中, 高能质子占绝对大的份额。

1 Weibull 函数

地面重离子加速器模拟研究表明, 器件芯片中敏感单元单粒子翻转与离子辐射的关系具有 Weibull 函数^[4]的分布:

$$\sigma_{hi}(E_d) = \begin{cases} \sigma_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{E_d - E_{th}}{W} \right)^S \right] \right\} & E_d \geq E_{th} \\ 0, & E_d < E_{th} \end{cases} \quad (1)$$

其中 σ_{hi} 为重离子致翻转截面, E_d 为入射粒子沉积于灵敏单元 (Sensible Volume, SV) 中的能量, E_{th} 为引起翻转所需的最小能量, σ_0 称为饱和截面, W 和 S 分别为 Weibull 函数的宽度和形状因子, E_{th} 、 σ_0 、 W 和 S 通常由实验决定。此式反映的是器件本身的特性, 对于给定器件, 翻转截面仅取决于 SV 内沉积的能量 E_d , 而与能量沉积方式、辐射粒子种类以及入射能量无关。

* 收稿日期: 2001-04-24

基金项目: 国家部委基金项目资助 (98J11.2.2, KG0126)

作者简介: 王同权 (1970-), 男, 讲师, 在职博士生。

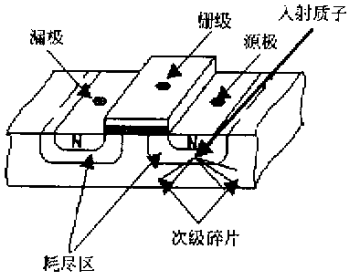


图1 入射质子与 N-MOS 器件作用

Fig.1 The incident proton interact with N-MOS devices

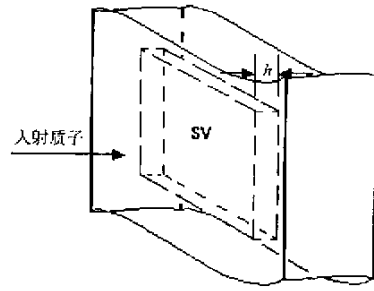


图2 灵敏单元简化模型

Fig.2 The simplified model of sensible volume

对于给定能谱分布的入射质子，可以计算得到在灵敏体积内因核反应产物引起的能量沉积 E_d ，进而可由 Weibull 函数估算器件的翻转截面。

2 能量沉积和器件的单粒子翻转率计算

沉积于灵敏单元中的电离能激发产生的自由电荷被 P-N 结的栅极和漏极收集，引起单粒子翻转。质子与器件的相互作用并引发单粒子翻转过程如图 1 中所示。耗尽区即为对辐射敏感的单元。质子入射到器件中后，引发的核反应可以生成多个产物，往往包括一个重碎片和几个轻碎片。而对于碎裂反应，有时一次可能生成多个重碎片，这些碎片在器件内穿行直至动能耗尽并沉积。很明显，在灵敏单元内及其周围发生的反应都有可能对单粒子翻转有贡献。

通常使用线能量转移 (LET) 分布和弦长分布计算发生在敏感单元外的核反应对单元内的电离能沉积贡献，但并不适用于单元内的核反应过程。我们基于图 1，将敏感单元简化为一埋在 P 型或 N 型半导体硅材料中的长方体，质子自左向右垂直入射硅平板材料 (参见图 2)，待求的是在所有体积中发生的核反应过程在 SV 中的电离能沉积。

由于几百 MeV 质子与 ^{28}Si 核反应产生的次级碎片的能量往往在几百 keV 到几 MeV 之间，对应的硅材料中的射程不超过几个微米，且碎片越重射程越短。因此我们假设比 α 粒子重的碎片都将能量全部沉积于当地，而 α 粒子及比它更轻的碎片由于其阻止本领较小，在敏感体积内的能量沉积被忽略。然后考虑一个能量为 E_p 的质子入射到厚度为 h 的敏感单元中的情形，质子在 h 路程内与硅核发生核反应的概率为 $P_n = 1 - e^{-\mu h}$ ，其中 $\mu = \sum_j \sigma_{Fj}(E_p)$ 为核反应总截面。当 h 足够小使得 $\mu h \ll 1$ (对于一般器件此条件基本上满足) 时， $P_n = 1 - (1 - \mu h) = \mu h$ ，即认为在敏感单元内发生核反应的概率均匀分布。因此可以假设图 2 中质子束引起的在灵敏单元内的能量沉积是均匀分布的，于是敏感单元内部的总能量沉积等于单位长度的能量沉积乘以单元厚度。

质子入射到硅平板中，在核反应处产生的次级碎片的通量可以写作^[5]

$$\phi_j(E) = \int \phi_p(E') f_j(E, E') dE' \quad (2)$$

其中 $\phi_p(E') = \delta(E' - E_p)$ 为入射质子通量， $f_j(E, E')$ 为能量为 E' 的质子产生能量为 E 的碎片的微分截面，碎片平均能量为 $3E_0$ (E_0 与靶核质量以及碎片质量有关)。

$$f_j(E, E') = \sigma_{Fj}(E') \sqrt{\frac{E}{2\pi E_0^3}} \exp\left(\frac{-E}{2E_0}\right) \quad (3)$$

因此所有这些次级碎片的总能量沉积为

$$E_{dep} = \sum_j \int_0^\infty E \phi_j(E) dE = 3 \sum_j E_0 \sigma_{Fj}(E_p) \quad (4)$$

由以上方法计算得到 SV 中的能量沉积，再由 Weibull 函数可以确定能量为 E_p 的质子引起的器件的翻转截面。若已知航天器飞行中遭遇的质子经屏蔽后的全向微分通量 $\phi(E_p)$ ，则可以估算出器件因

质子引发的单粒子翻转率 $R = \int_{E_p^{\min}}^{E_p^{\max}} \sigma_{hi}(E_p) \phi(E_p) dE_p$ 。CRRES 卫星^[4]的轨道近地点 350km，远地点 33584km，轨道倾角 18.1°，使用俘获辐射带质子通量模式 AP-8 的计算结果^[6]作为入射质子积分通量。卫星壳体的屏蔽使用 33mm 的铝平板近似，经屏蔽后的全向微分通量 $\phi(E_p)$ 通过求解径直向前近似的输运方程计算^[5]，核碎片选取²⁷Al 到⁶He 共 27 种。

3 结果与分析

使用上述方法计算了 CRRES 卫星上的几种器件的质子翻转率（见表 1），表中列出与实测值的比较。考虑到质子通量模式、铝平板屏蔽近似、重离子实验的误差，可以认为除器件 92L44 和 21L47 外，数据吻合得比较好。

表 1 CRRES 卫星上的几种器件的质子翻转率（单位： $(\text{bit} \cdot \text{d})^{-1}$ ）

Tab.1 The SEU rate of several devices in the CRRES satellite (Unit： $(\text{bit} \cdot \text{d})^{-1}$)

器件	Intel 2164A	93422	93L422	82S212	92L44	21L47	6116
观测值 ^[4]	8.10e-5	4.2e-3	3.15e-3	8.29e-4	1.12e-4	6.40e-5	3.1e-6
计算值	2.80e-4	5.35e-3	3.85e-3	8.98e-4	2.74e-2	1.36e-2	6.53e-6

92L44 和 21L47 的单粒子翻转率的估算数值与实测值比较，出现了较大的偏差。分析器件的参数可以发现，这两个器件的饱和翻转截面与其他的器件比较大，并且它们的 SV 厚度均为 $5\mu\text{m}$ ，比其他的器件要厚几倍。首先，较大的 SV 厚度可能使得图 2 中对 SV 的几何模型简化不再适用，我们对模型的简化在 SV 厚度与器件衬底等其他部分材料尺寸的比值足够小时才能成立，如果 SV 厚度增大，则估算的能量沉积将不仅仅线性地增大，而且模型本身将大大高估 SV 中沉积的能量；其次，重离子实验获得的此两种器件的饱和截面数据比其他器件大两个数量级，因此可以推断可能该两种器件的结构与其他器件不同，而正是这种结构上的不同更加大了计算结果与实测值的差别。

参考文献：

- [1] 王同权等. 空间辐射环境中的辐射效应 [J]. 国防科技大学学报, 1999, 21(4): 36~39.
- [2] 王同权等. 空间辐射效应的蒙特—卡罗模拟 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(3): 339~342.
- [3] 都亨等. 中国空间科学进展 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [4] Petersen E L. Prediction and Observations of SEU Rates in Space [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1997, 44(6): 2174-2187.
- [5] 薛晓东. 宇宙空间高能质子运输及其辐射效应的数值模拟研究 [D]. 国防科技大学研究生院, 2001.
- [6] Adams J H Jr, et al. Cosmic Ray Effects on Microelectronics [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1982, 29(1): 169-171.

