第21卷 第3期 空 间 科 学 学 报 Vol.21, No.3
2001 年 7月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE July, 2001

空间轨道单粒子翻转率预估方法研究

贺朝会
(西北核技术研究所 西安 710024)

摘 要

系统分析了国外单粒子翻转率预估方法，提出了一种适合国内现状的单粒子翻转率预估方法，计算了五个典型轨道上的单粒子翻转率和轨道翻转率系数，为评价半导体器件抗单粒子效应的能力提供了依据.

关键词 空间轨道—单粒子翻转率—质子—重离子

1 引 言

空间辐射环境中的高能质子和重离子会使在空间轨道上运行的航天器的电子系统中的半导体器件发生单粒子效应，严重影响航天器的可靠性和寿命 [1,2]. 根据地面模拟实验结果，结合空间轨道上的高能质子和重离子分布，预估空间轨道上半导体器件的单粒子翻转率，对正确选用半导体器件，提高航天器的可靠性和寿命具有重大的现实意义；对正确评价半导体器件的抗单粒子效应能力具有指导作用和参考价值.

几乎所有的单粒子翻转率预估程序：CRIER (Cosmic Ray Induced Error Rate)、CREME(Cosmic Ray Effects in Microelectronics)、SPACE RADIATION、CUPID(Clemson University Proton Interaction in Devices) 等都建立在 RPP(Rectangular Parallelepiped) 模型上，模拟入射离子在灵敏体积内的能量沉积，物理概念清晰、直观，但计算复杂，需要输入灵敏体积的尺寸等器件参数. 我们在中国空间技术研究院提供的轨道参数和带电粒子能谱数据的基础上，提出了一种适合国内现状的单粒子翻转率预估方法. 和其他方法相比，该方法可以不考虑器件的结构参数，仅根据地面模拟实验结果就可以预估空间轨道的单粒子翻转率，简单实用.

2 空间辐射环境

空间辐射环境主要由三部分组成：地球辐射带、银河宇宙线和太阳宇宙线.

地球辐射带是由地球磁场捕获的质子和电子组成. 质子能量范围为 0.1—400 MeV, 通量范围为 8×10^4—$5\times10^7\,\mathrm{cm^{-2}\cdot s^{-1}}$; 电子能量范围为 0.004—7.0 MeV, 通量范围为 7×10^3—$5\times10^8\,\mathrm{cm^{-2}\cdot s^{-1}}$.

银河宇宙线起源于银河系，由能量极高而通量极低的带电粒子组成. 它们连续不断地从四面八方射入地球空间. 银河宇宙线中所含离子成份很宽，从原子序数 1 到 92 的元素

2000-12-25 收到原稿， 2001-05-10 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

都有. 但离子含量差别极大，一般认为质子约占 85%, α 粒子约占 12.5%, 元素锂到铁的离子约占 1.5%, 其他元素的含量更少. 银河宇宙线通量在赤道附近约 $5\times10^3\,\mathrm{m^{-2}\cdot s^{-1}}$, 高纬度区约 $2\times10^4\,\mathrm{m^{-2}\cdot s^{-1}}$. 银河宇宙线的能量分布很广，从 40 MeV 到 10^{13} MeV.

太阳宇宙线是太阳表面发生的太阳耀斑爆发出的高能带电粒子. 在不到 1 h 的时间内，它们就可到达地球轨道附近，并可延续数小时到一天以上的时间. 所以，太阳宇宙线的出现是随机的. 在太阳活动高年，出现的次数较多，且强度较大. 另外，对于空间某一点而言，太阳宇宙线的强度还随时间变化. 在一段时间内强度最大，这时的能谱称为峰值谱. 太阳宇宙线的主要成份为质子，能量为 10—10^2 MeV, 有的甚至可达 10 GeV; 通量可达 $10^4\,\mathrm{m^{-2}\cdot s^{-1}}$. 一次太阳质子事件可持续 30—40 h, 累积注入量可达 $10^9\mathrm{m^{-2}}$.

本文计算选用的轨道包括低轨道、太阳同步轨道、大椭圆轨道、高轨道和地球同步轨道五条轨道. 既考虑我国已经发射和正在研制中的卫星，又考虑空间辐射环境分布. 轨道参数和带电粒子能谱分布采用中国空间技术研究院提供的数据.

3　单粒子翻转率预估方法

单粒子翻转率预估就是根据地面模拟实验结果，结合空间轨道上的高能质子和重离子分布，预估空间轨道上半导体器件的单粒子翻转率. 地面模拟实验结果是指利用地面模拟设备，如质子加速器、重离子加速器和 ^{252}Cf 源等辐射源，辐照半导体器件，测量其单粒子翻转数，一般表示为器件单粒子翻转截面 ($\mathrm{cm^2}$), 或位单粒子翻转截面 ($\mathrm{cm^2/bit}$). 空间轨道上半导体器件的单粒子翻转率是指器件每天每位发生单粒子翻转或错误的概率，一般称为单粒子翻转率 ($\mathrm{d^{-1}\cdot bit^{-1}}$). 由于空间辐射环境中的离子种类分布很广，能量范围很宽，并且都是连续谱，而地面模拟辐射源所能提供的离子种类有限，能量范围较小. 另外，在空间辐射环境中，离子入射基本是各向同性的，地面模拟很难做到，一般都是垂直入射. 因此，需要研究根据地面实验结果，如何正确和准确地预估空间轨道上半导体器件的单粒子翻转率.

3.1　质子单粒子翻转率预估方法

计算由空间质子产生的单粒子翻转率，首先需知道空间质子能谱，其次是不同能量质子的单粒子翻转截面，两者积分即可得质子单粒子翻转率 [3], 可表示为

$$R_{\mathrm{p}}=\int_{E_0}^{E_{\max}}\Phi(E)\sigma(E)\mathrm{d}E. \tag{1}$$

式中 R_{p} 为质子单粒子翻转率 ($\mathrm{d^{-1}\cdot bit^{-1}}$), $\Phi(E)$ 为质子微分能谱 ($\mathrm{cm^{-2}\cdot d^{-1}\cdot MeV^{-1}}$), $\sigma(E)$ 为单粒子翻转截面 ($\mathrm{cm^2/bit}$), E 为质子能量 (MeV), E_0 为单粒子翻转质子能量阈值 (MeV), $E_{\max}$ 为空间质子最大能量 (MeV). 如果已知的空间质子能谱是以质子能量为参数的积分能谱，那么需要将质子积分能谱转换成微分能谱，并得到不同能量质子的单粒子翻转截面.

Bendel 和 Petersen 在核反应能谱学的基础上，提出了双参数公式，描述质子单粒子翻转截面与质子能量的关系 [4,5]:

$$\sigma_{\mathrm{p}}=\sigma_{\mathrm{p}}(\infty)\left[1-\exp(-0.18Y^{0.5})\right]^4. \tag{2}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

参数 Y 表示为 $Y=(18/A)^{0.5}(E-A)$, 其中 E 为质子能量， A 对应于发生单粒子翻转所需的能量阈值， E 和 A 的单位为 MeV. $\sigma_{\mathrm{p}}(\infty)$ 为质子能量 ∞ 时的单粒子翻转截面，也称极限截面. 根据两个能量点的实验数据，通过数值求解方程组，可以得到参数 $\sigma_{\mathrm{p}}(\infty)$ 和 A. 这在原理上是可行的，但实际计算很困难，可能得不到收敛解. 大多数情况下采用作图法，选取不同的参数 $\sigma_{\mathrm{p}}(\infty)$ 和 A, 根据 (2) 式绘出单粒子翻转截面与质子能量的关系曲线. 曲线与实验数据符合最好时的参数 $\sigma_{\mathrm{p}}(\infty)$ 和 A, 即为该器件的单粒子翻转极限截面和能量阈值，同时得到了其他能量点的单粒子翻转截面. 进行实验的两个能量点最好一个在翻转阈值附近，一个大于 100 MeV, 这样得到的参数可靠性较高.

由于质子单粒子效应与重离子单粒子效应具有许多相同的特征， Rollins[6] 试图找到一种方法来将质子翻转截面和重离子的测试数据联系起来. 通过分析大量器件的质子和重离子单粒子效应实验数据，得到了一个经验公式:

$$\sigma_{\mathrm{p}}(\infty)/\sigma_{\mathrm{h}}\cdot t=1.27\times10^{-5}\exp(-0.383L_0^{1.41}) \tag{3}$$

来描述质子单粒子翻转极限截面 $\sigma_{\mathrm{p}}(\infty)$ 和重离子单粒子翻转饱和截面 σ_{h} 、器件灵敏区的厚度 t 及重离子 LET 阈值 $L_0(\mathrm{MeV\cdot cm^2/mg})$ 之间的关系. 通过测量重离子单粒子翻转截面，得到 LET 阈值 L_0. 重离子 LET 阈值 L_0 被定义为单粒子翻转饱和截面的 10% 处所对应的重离子的 LET 值. 根据器件灵敏区的厚度 t, 通过 (3) 式，可求得质子单粒子翻转的极限截面 $\sigma_{\mathrm{p}}(\infty)$. Barak 等人 [7] 提出了另外一种计算质子单粒子翻转的极限截面 $\sigma_{\mathrm{p}}(\infty)$ 的方法:

$$\sigma_{\mathrm{p}}(\infty)=2.22\times10^{-5}\sigma_h/L_{0.25}^2. \tag{4}$$

式中 $L_{0.25}$ 为单粒子翻转饱和截面的 25% 处所对应的重离子的 LET 值. 对于同一个器件， (3) 式和 (4) 式的计算结果会有倍数的差异，在数量级上是一致的. Petersen[4] 提出了一个简单的质子与重离子单粒子翻转阈值相互转换的公式:

$$A=L_0+15. \tag{5}$$

根据 (5) 式，得到 Bendel 公式中的参数 A, 从而根据 (2) 式计算质子单粒子翻转截面，应用 (1) 式计算空间质子的单粒子翻转率.

较为复杂的方法是核反应分析法 [8]. 在质子与半导体材料反应的基础上，应用 Monte Carlo 方法，模拟计算质子在灵敏体积内的能量沉积，进一步得到不同能量质子的单粒子翻转截面. 应用 (1) 式计算空间质子的单粒子翻转率. CUPID 和 HETC 程序就是采用这种方法计算空间质子的单粒子翻转率. Miroshin 和 Trerskoy 结合 Monte Carlo 计算与实验结果，提出一个双参数模型用于单粒子翻转计算:

$$\sigma=n\times V\times\sigma_i\times\varepsilon(E_t). \tag{6}$$

式中， n 为单位体积 $(\mathrm{cm^3})$ 的硅原子核数； V 为存储单元灵敏体积； σ_{i} 为质子与硅非弹性作用截面； $\varepsilon(E_t)$ 表示在体积 V 内沉积的能量大于翻转阈值的相互作用的比例系数. 其中 V 和 $\varepsilon(E_t)$ 为参数. 函数 $\varepsilon(E_t)$ 根据能量沉积积分谱求得. 根据两个或多个能点的单粒子翻转截面实验值，通过 Monte Carlo 迭代计算两个未知参数 V 和 E_t.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

由于地面模拟设备——质子加速器的能量有限，特别是我国目前没有能量大于 35 MeV 的质子加速器，不可能通过实验得到整个单粒子翻转截面与质子能量的关系. 因此，需通过实验与理论计算相结合的方法，得到整个单粒子翻转截面与质子能量的关系. 可以利用国内高能质子加速器，实验测量导致单粒子翻转的质子能量阈值，理论计算不同能量质子的单粒子翻转截面 [9]. 在保证低能段理论计算结果与实验结果符合的基础上，得到单粒子翻转截面与质子能量的关系曲线，从而计算空间质子的单粒子翻转率.

3.2　重离子单粒子翻转率预估方法

计算由空间重离子产生的单粒子翻转率，首先需知道空间重离子 LET 谱，其次是不同 LET 值的重离子的单粒子翻转截面. 但不能像质子那样，把二者简单积分就可求出翻转率，这是由于重离子的有效的 LET 值与离子入射方向有关. 因此，需把重离子谱或翻转截面进行修正，这样就产生了两种计算重离子单粒子翻转率的方法：等效注量法 [10] 和等效截面法 [7].

等效注量法的计算公式为

$$R_{\mathrm{H}}=\int_0^{\infty}\Phi_{\mathrm{e}}(L)\sigma(L)\mathrm{d}L. \tag{7}$$

式中 R_{H} 为重离子单粒子翻转率，L 为重离子 LET 值，$\Phi_{\mathrm{e}}(L)$ 为以 LET 值为变量的等效重离子微分谱，也称全向微分通量谱 [11]，$\sigma(L)$ 为 LET 值为 L 的重离子的单粒子翻转截面. 考虑各向同性入射的离子束，L_{c} 为单粒子翻转 LET 阈值. 当 $L>L_{\mathrm{c}}$ 时，所有方向入射的离子都会导致单粒子翻转；当 $L\leqslant L_{\mathrm{c}}$，存在一个临界角 $\theta_{\mathrm{c}}=\arccos(L/L_{\mathrm{c}})$，入射角 $\theta>\theta_{\mathrm{c}}$ 时，才会导致单粒子翻转. 因此，全向微分通量谱 $\Phi_{\mathrm{e}}(L)$ 可表示为

$$\begin{aligned}\Phi_{\mathrm{e}}(L)=&\frac{\Phi(L)}{2\pi}\int_{\theta_{\mathrm{c}}}^{\pi/2}\cos\theta\mathrm{d}\Omega=\frac{\Phi(L)}{2}\cos^2\theta_{\mathrm{c}}\\=&\begin{cases}\dfrac{\Phi(L)}{2}\left(\dfrac{L}{L_{\mathrm{c}}}\right)^2, & L\leqslant L_{\mathrm{c}};\\[2ex] \dfrac{\Phi(L)}{2}, & L>L_{\mathrm{c}}.\end{cases}\end{aligned} \tag{8}$$

式中 $\Phi(L)$ 为重离子微分谱. 把 $\Phi_{\mathrm{e}}(L)$ 代入 (7) 式，对不同 LET 值的离子分段积分可求得重离子单粒子翻转率.

等效截面法的计算公式为

$$R_{\mathrm{H}}=\int_0^{\infty}\Phi(L)\sigma_{\mathrm{e}}(L)\mathrm{d}L. \tag{9}$$

式中 $\Phi(L)$ 为重离子微分谱，$\sigma_{\mathrm{e}}(L)$ 为 LET 值为 L 的重离子的等效单粒子翻转截面. 等效截面 $\sigma_{\mathrm{e}}(L)$ 是所有入射角的单粒子翻转截面的平均. 假设灵敏区的表面为圆形，直径为 a，灵敏区的厚度为 c. 器件的单粒子翻转能量阈值为 ε_{c}，则对应的临界 LET 值为 $Lc=\varepsilon_{\mathrm{c}}/\rho c$，其中 ρ 为芯片材料的质量密度. 对于沿 θ(与芯片表面法向的夹角) 方向入射的离子束，它在灵敏区内运动的径迹长度为 $l=c/\cos\theta$，与灵敏区的截面积为 $\sigma_\theta=S\cos\theta$，其中 $S=\pi a^2/4$. 对于一定 LET 值的离子，只有当 $\theta>\theta_{\mathrm{c}}$ 时，才会导致单粒子翻转. 当 $L\geqslant L_{\mathrm{c}}$，所有方向入射的离子都会导致单粒子翻转，$\theta_{\mathrm{c}}=0$；当 $L\leqslant L_{\mathrm{c}}$，$\theta_{\mathrm{c}}=\arccos(L/L_{\mathrm{c}})$；当 $L\leqslant\varepsilon_{\mathrm{c}}/\rho a$，$\theta_{\mathrm{c}}=\pi/2$，任何方向入射的离子都不会导致单粒子翻转. 等效截面 $\sigma_{\mathrm{e}}(L)$ 可

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

表示为

$$\sigma_{\mathrm{e}}(L)=\int_{\theta_{\mathrm{c}}}^{\pi/2}\sigma_{\theta}\sin\theta\mathrm{d}\theta=\frac{S}{2}\cos^{2}\theta_{\mathrm{c}} \tag{10}$$

$$=\begin{cases}\dfrac{S}{2}\left(\dfrac{L}{L_c}\right)^{2}, & \varepsilon_{\mathrm{c}}/\rho a<L<L_{\mathrm{c}};\\ 0, & L\leqslant\varepsilon_{\mathrm{c}}/\rho a;\\ \dfrac{S}{2}, & L\geqslant L_{\mathrm{c}}.\end{cases}$$

把 $\sigma_e(L)$ 代入 (9) 式，对不同 LET 值的离子分段积分可求得重离子单粒子翻转率.

从两种方法的最终结果看，二者是一致的. 因此，应用任何一种方法计算重离子单粒子翻转率都是可行的. 如果已知的是空间重离子能谱，则需要应用 TRIM 程序或其他方法把重离子能谱转换成以 LET 值为变量的重离子微分谱，从而应用 (7) 式或 (9) 式计算空间重离子单粒子翻转率.

3.3 FOM (Figure Of Merit) 方法 [10,12,13]

Petersen 提出，参数 F 比 LET 阈值和临界电荷更能准确地反映器件的单粒子翻转敏感度. F 可以由重离子实验数据计算得到，也可以由质子实验数据计算得到. 计算公式分别为

$$F=\sigma_{\mathrm{h}}/L_{0.25}^{2}; \tag{11}$$

$$F=4.5\times10^{4}\times\sigma_{\mathrm{p}}(\infty), \tag{12}$$

式中参数定义与 (4) 式相同. 仅用 F 就可预估几乎所有轨道上的单粒子翻转率. 计算公式为

$$R=C\times F. \tag{13}$$

式中 R 为单粒子翻转率，F 为无量纲的参数，C 为轨道翻转率系数，单位为 upsets/(d·bit). C 依赖于轨道、屏蔽、离子种类 (质子或重离子) 和器件的类型 (加固与非加固).

选择少量器件参数已知的加固和非加固器件，应用 3.1 和 3.2 节的方法计算任何一个特定轨道的单粒子翻转率 R, 或者进行空间飞行试验，实际测量其单粒子翻转率. 再根据地面模拟实验结果，由 (11) 式或 (12) 式计算出器件的 F 参数，应用 (13) 式得到参数 C. 反过来应用，对于其它的同类器件，根据地面模拟实验结果，应用 (11) 式或 (12) 式计算出器件的 F 参数，乘以参数 C 就可得到在该轨道上的单粒子翻转率 R. 同类器件的类别仅分为加固和非加固，也就是说用加固器件得到的参数 C, 只能用来计算加固器件的单粒子翻转率；用非加固器件得到的参数 C, 只能用来计算非加固器件的单粒子翻转率.

应用 3.1 和 3.2 节的方法分别计算出质子和重离子的单粒子翻转率. 因为对于质子和重离子， C 是不同的. 单粒子翻转率 R 等于由质子和重离子分别得到的参数 C 之和乘以器件的 F 参数，可表示为

$$R=R_{\mathrm{p}}+R_{\mathrm{h}}=C_{\mathrm{p}}\times F+C_{\mathrm{h}}\times F=(C_{\mathrm{p}}+C_{\mathrm{h}})\times F. \tag{14}$$

式中 R_{p} 为质子单粒子翻转率， R_{h} 为重离子单粒子翻转率， C_{p} 和 C_{h} 为对应参数.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

FOM 方法 [10,12,13] 是通过对大量实验数据分析处理得到的，在文献 [12] 中，Petersen 给出了许多器件在不同轨道上的计算结果. Barak 等人 [7] 对 FOM 方法进行了分析和验算，认为在大多数情况下，通过 FOM 方法计算得到的单粒子翻转率与其他方法 (如 CREME96 和 Space Radiation 软件) 的计算结果符合很好；对于低能质子在质子能谱中占很大比例的轨道和抗单粒子翻转能力很强的器件，符合稍差；对于特定器件，像 FPGA，根据质子数据计算的 F 参数比根据重离子数据计算的 F 参数小一个量级.

4　计算实例

根据上面的分析，3.1 和 3.2 节的单粒子翻转率预估方法，物理概念清晰、直观，但计算复杂，需要输入灵敏体积的尺寸等器件参数. 而我国在轨卫星上应用的器件基本都是国外产的，器件参数很难得到. 另外，我国没有能量大于 35 MeV 的质子加速器，不可能通过实验得到完整的单粒子翻转截面与质子能量的关系曲线. 而国内重离子加速器可提供 LET 值为 2—40 MeV·cm^2/mg 的重离子，可以测量大多数器件的单粒子翻转阈值和饱和截面. 那么立足于国内单粒子效应模拟设备，根据重离子实验数据，应用 FOM 方法预估空间轨道单粒子翻转率是否可行？下面计算了 3 个器件在不同轨道上的单粒子翻转率. 计算所用的轨道参数见表 1.

表 1　计算所用的轨道参数

轨道序号	轨道分类	轨道参数		
		远地点 /km	近地点 /km	倾角 /(°)
1	低轨道	500	500	52
2	太阳同步轨道	870	870	98.9
3	大椭圆轨道	36 000	200	28.5
4	高轨道	20 000	20 000	63.4
5	地球同步轨道	35 790	35 790	0

静态随机存取存储器 HM628128(1 Mbit) 的重离子单粒子翻转 LET 阈值 6.0 MeV·cm^2/mg，饱和截面 25% 处的 LET 值为 8.5 MeV·cm^2/mg 左右，重离子单粒子翻转饱和截面 1.25×10^{-7} cm^2·bit^{-1}. 器件的 F 参数为 1.73×10^{-9}，计算结果见表 2.

表 2　空间轨道上 HM628128 的单粒子翻转率计算结果

轨道序号	质子单粒子翻转率 (d^{-1}·bit^{-1})	重离子单粒子翻转率 (d^{-1}·bit^{-1})	单粒子翻转率 (d^{-1}·bit^{-1})	轨道翻转率系数 C
1	1.79×10^{-7}	6.27×10^{-9}	1.85×10^{-7}	106.93
2	8.15×10^{-7}	6.74×10^{-8}	8.22×10^{-7}	475.12
3	1.52×10^{-6}	1.00×10^{-7}	1.62×10^{-6}	936.36
4	1.75×10^{-10}	1.96×10^{-7}	1.96×10^{-7}	113.29
5	1.94×10^{-10}	1.31×10^{-7}	1.31×10^{-7}	75.72

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

1991 年发射的 UoSAT-5 卫星 [14], 轨道半径 770 km, 倾角 98.5°, 与 2# 轨道接近. 在轨观测到 HM628128 的单粒子翻转率为 $3.4 \times 10^{-7}\mathrm{d}^{-1}\cdot\mathrm{bit}^{-1}$, 和表 2 的预估值接近. 考虑到轨道参数的差异, 应该说二者符合很好.

IDT71256 的重离子单粒子翻转 LET 阈值 4.0 $\mathrm{MeV}\cdot\mathrm{cm}^2/\mathrm{mg}$, 饱和截面 25% 处的 LET 值为 4.2 $\mathrm{MeV}\cdot\mathrm{cm}^2/\mathrm{mg}$ 左右, 重离子单粒子翻转饱和截面 $1.5 \times 10^{-7}\,\mathrm{cm}^2\cdot\mathrm{bit}^{-1}$. 器件的 F 参数为 8.50×10^{-9}, 计算结果见表 3.

表 3 空间轨道上的 IDT71256 单粒子翻转率计算结果

轨道序号	质子单粒子翻转率 ($\mathrm{d}^{-1}\cdot\mathrm{bit}^{-1}$)	重离子单粒子翻转率 ($\mathrm{d}^{-1}\cdot\mathrm{bit}^{-1}$)	单粒子翻转率 ($\mathrm{d}^{-1}\cdot\mathrm{bit}^{-1}$)	轨道翻转率系数 C
1	8.73×10^{-7}	2.92×10^{-8}	9.02×10^{-7}	106.08
2	3.96×10^{-6}	2.79×10^{-7}	4.24×10^{-6}	498.51
3	7.52×10^{-6}	4.76×10^{-7}	8.00×10^{-6}	940.33
4	8.32×10^{-10}	8.28×10^{-7}	8.29×10^{-7}	117.60
5	9.21×10^{-10}	6.24×10^{-7}	6.25×10^{-7}	73.49

IDT7164 的重离子单粒子翻转 LET 阈值 4.2 $\mathrm{MeV}\cdot\mathrm{cm}^2/\mathrm{mg}$, 饱和截面 25% 处的 LET 值为 4.6 $\mathrm{MeV}\cdot\mathrm{cm}^2/\mathrm{mg}$ 左右, 重离子单粒子翻转饱和截面 $2.5 \times 10^{-7}\mathrm{cm}^2\cdot\mathrm{bit}^{-1}$. 器件的 F 参数为 1.18×10^{-8}, 计算结果见表 4.

表 4 空间轨道上的 IDT7164 单粒子翻转率计算结果

轨道序号	质子单粒子翻转率 ($\mathrm{d}^{-1}\cdot\mathrm{bit}^{-1}$)	重离子单粒子翻转率 ($\mathrm{d}^{-1}\cdot\mathrm{bit}^{-1}$)	单粒子翻转率 ($\mathrm{d}^{-1}\cdot\mathrm{bit}^{-1}$)	轨道翻转率系数 C
1	1.19×10^{-6}	4.62×10^{-8}	1.24×10^{-6}	104.95
2	5.41×10^{-6}	4.47×10^{-7}	5.86×10^{-6}	495.99
3	1.02×10^{-5}	7.53×10^{-7}	1.09×10^{-5}	922.58
4	1.14×10^{-9}	1.32×10^{-6}	1.32×10^{-6}	111.72
5	1.26×10^{-9}	9.86×10^{-7}	9.87×10^{-7}	83.54

表 2—4 中的轨道翻转率系数符合很好, 说明对于同一类型的器件 (同类器件的类别仅分为加固和非加固), 虽然生产厂家不同, 单粒子翻转率大小不一, 但轨道翻转率系数是一定的, 它反映了轨道的单粒子翻转特性.

5 结 论

立足于国内单粒子效应模拟设备, 根据重离子实验数据, 应用 FOM 方法预估空间轨道单粒子翻转率是一种切实可行的方法. 根据表 2—4 的单粒子翻转率计算结果可知, 对于低轨道、太阳同步轨道和大椭圆轨道, 主要是质子导致单粒子翻转; 对于高轨道和地球同步轨道, 主要是重离子导致单粒子翻转.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

参　考　文　献

[1] 蒲剑，叶宗海. 空间粒子辐射对卫星中集成芯片的影响. 空间科学学报， 1993, **13**(4):292—298

[2] 古士芬等. 美国几架航天飞机所发生的 SEU 研究. 空间科学学报， 1998, **18**(3):253—260

[3] 韩建伟，叶宗海. 质子引发的单粒子翻转率估算的研究. 空间科学学报， 1999, **19**(3):266—271

[4] Bendel W L, Petersen E L. Proton upsets in orbit. *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, 1983, **30**(6):4 481—4 485

[5] Stapor W J *et al.* Two parameter bendel calculations for predicting proton induced upset. *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, 1990, **37**(6):1 966—1 973

[6] Rollins J G. Estimation of proton upset rates from heavy ion test data. *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, 1990, **37**(6):1 961—1 965

[7] Barak J, Reed R A, Label K A. On the figure of merit model for SEU rate calculations. *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, 1999, **46**(6):1 504—1 510

[8] Petersen E L. Approaches to proton single event rate calculations. *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, 1996, **43**(2):496—504

[9] 贺朝会等. 质子单粒子翻转截面计算方法. 中国空间科学技术， 2000,**20**(5):10—16

[10] Binder D. Analytic SEU rate calculation compared to space data. *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, 1988, **35**(6):1 570—1 572

[11] 韩建伟. 高能重离子径迹结构对单粒子翻转的影响. 空间科学学报， 2000, **20**(4):333—339

[12] Petersen E L, Langworthy J B. Suggested single event upset figure of merit. *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, 1983, **30**(6):4 533—4 539

[13] Petersen E L. The SEU figure of merit and proton upset rate calculations. *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, 1998,**45**(6):2 550—2 562

[14] Sorensen R H *et al.* Observation and prediction of SEU in HITACHI SRAMs in low altitude polar orbits. *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, 1993, **40**(6):1 498—1 504

STUDY OF METHODS FOR PREDICTING SEU RATE IN SPACE ORBITS

HE Chaohui

(*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024)

Abstract

The methods for predicting Single Event Upset (SEU) rate abroad were analyzed. A method was proposed suitable for domestic status for predicting SEU rate. SEU rates and orbit specific rate coefficients were calculated in five typical orbits, and a tool is provided to assess the ability of semiconductor devices against SEU.

Key words　Space orbit, Single event upset rate, Proton, Heavy ion

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com