

# 基于 RPP 模型的单粒子在轨翻转率计算

耿超<sup>1, 2</sup>, 刘杰<sup>1</sup>, 侯明东<sup>1</sup>, 孙友梅<sup>1</sup>, 段敬来<sup>1</sup>, 姚会军<sup>1</sup>

张战刚<sup>1, 2</sup>, 莫丹<sup>1</sup>, 罗捷<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

<sup>2</sup> (中国科学院研究生院 北京 100190)

**摘要:** 宇航半导体器件的单粒子翻转对航天电子系统的功能产生严重的影响, 因此必须针对性的采取加固措施, 而在轨翻转率的研究是加固的重要依据之一。文中依据单粒子效应的两个重要参数: LET 能谱和翻转截面, 结合 RPP 模型单粒子翻转率计算公式, 获得了已测器件在不同尺寸参数灵敏体积下的在轨翻转率预示结果, 并与搭载试验结果相比较。分析表明灵敏体积的尺寸和漏斗深度对器件单粒子在轨翻转率预示结果具有一定的影响, 且灵敏体积尺寸参数为  $P \geq 1$  时在 RPP 模型计算下的已测器件单粒子在轨翻转率的准确性更强, 而优化系数漏斗深度的选取, 则与器件的结构、掺杂浓度有着密切的关系。

**关键词:** 单粒子在轨翻转率, RPP 模型, 漏斗深度, 灵敏体积

## Calculation of On-Orbit Single Event Upset Rates Based on RPP model

C. Geng<sup>1, 2, \*</sup>, J. Liu<sup>1, \*</sup>, M. D. Hou<sup>1</sup>, Y. M. Sun<sup>1</sup>, J. L. Duan<sup>1</sup>, H. J. Yao<sup>1</sup>,

Z. G. Zhang<sup>1, 2</sup>, D. Mo<sup>1</sup>, J. Luo<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences Lanzhou 730000)

<sup>2</sup> (Graduate University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100190)

**Abstract:** The single event upset of aerospace semiconductor devices has probably serious effects on the function of aerospace electronic system, and therefore it must be taken specific radiation-hardened measurements, as well as the rate of on-orbit single event upset plays a vital role in radiation-hardened technologies. The article based on two appropriate metrics: LET energy spectrum and single event upset cross-section, combined with the on-orbit single event upset calculation formulas of RPP model, has accordingly obtained simulated single event upset rates on different sensitive volumes of expected experimental devices, and carrying compared with experimental results. Analytically, it indicates that sensitive volume and funneling depth have an impact on the simulated results for devices' single event upset. The accuracy of single event upset rates is better when selected sensitive volumes' ratio  $P \geq 1$  of the funneling depth; the other optimized coefficient, is more related on devices structure and doping concentration.

**Keywords:** on-orbit single event upset rates, RPP model, funneling depth, sensitive volume.

### 1. 引言

空间环境中的宇宙射线(高能带电粒子等)及地面模拟辐射源均能对航天器材料、集成电路和电子学元器件产生辐射损伤, 早期发现的辐射损伤效应主要包括总剂量效应和位移损

伤效应；Binder 等<sup>[1]</sup>于 1975 年提出卫星航天器运行中的异常现象有可能由单个高能重离子或质子所引起半导体器件逻辑状态改变的单粒子效应导致。

近年来，单粒子效应的研究方法主要包括地面模拟实验和空间飞行搭载测试，其中地面模拟实验的粒子源种类及受用时间均具有一定的限制性，而且空间飞行搭载测试的周期较长及经费大，同样也受时间及有效器件测试数量的局限。相对而言，单粒子效应的计算仿真研究具有灵活多样性，且可从微观角度深入研究单粒子效应的理论机制。国际上对单粒子效应的仿真计算开展了广泛的研究，如 Vanderbilt 大学、斯坦福直线加速器中心及美国圣地亚国家实验室的研究人员<sup>[2-5]</sup>利用计算机模拟仿真针对核反应产物（非直接电离）对单粒子翻转截面影响的研究已经取得了一定的成效，这表明单粒子效应的仿真计算研究具有一定的灵活性和参考性。

本文利用 CRÈME96 程序对空间辐射环境进行了模拟和综合分析，采用基于蒙特卡罗的 RPP（Rectangular Parallel Piped）模型，选取不同灵敏区体积尺寸和漏斗深度对在轨已测试电子元器件的单粒子翻转率进行了计算分析。

## 2. 计算仿真过程

### 2.1. 空间辐射环境

航天器在空间所遭受的外部辐射环境主要由辐射粒子种类、能量和通量决定。文中采用 CRÈME 96 程序模拟宇宙射线，对来源于 1977 年的太阳静态模式下的地球同步轨道辐射环境进行仿真，选取原子序数为 1~92 的粒子，对应 LET (Linear Energy Transfer, 线性能量传递) 值为  $1.0 \times 10^{-3} \sim 102.6 \text{ MeV-cm}^2/\text{mg}$ 。对于轨道参数的选定，依赖的是 McIlwain L 系数，McIlwain 系数标定的是磁场线的地磁坐标和粒子漂移的磁壳层，L 相当于地球磁偶极子中心与磁赤道磁场线的距离，例如：南大西洋磁异常区(SAA)，是低轨道单粒子效应的多发区，其 L 值大概为  $L=1.2 \sim 2$ ，文中对应地球同步轨道上 L 值约为 6.6。

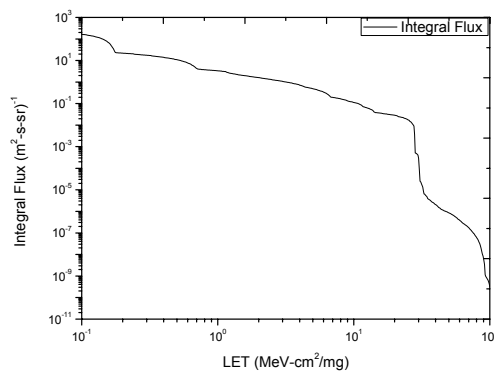


图 1 粒子通量随在硅中 LET 值变化的曲线

Fig. 1 Integral LET curve for particles Z=1 to 92 and through silicon for particle flux

研究空间辐射环境中的器件时，主要以硅为研究对象。图 1 所示为空间辐射粒子通量随在硅中 LET 值变化的曲线。从图 1 看出，在对数坐标系中，粒子的积分通量随着 LET 值的增大而下降，直到 LET 值约等于 34.7 MeV-cm<sup>2</sup>/mg 和 78.1 MeV-cm<sup>2</sup>/mg 处，积分通量发生陡降，主要是由于对应元素的丰度影响。因此 LET 值为 34.7 MeV-cm<sup>2</sup>/mg 和 78.1 MeV-cm<sup>2</sup>/mg 时对器件单粒子翻转率的研究具有重要的意义。另一方面，LET 值变化曲线积分是 RPP 模型计算器件在轨翻转率的一个重要参量，图 1 所给的积分曲线将作为初始条件应用到在轨翻转率的计算中。

## 2.2. RPP 计算模型

利用 LET 值来计算单粒子效应在轨翻转率，即可将空间环境中的粒子种类和能量分布简化为 LET 曲线来表示，那么能量的沉积即为：

$$E_{\text{沉积}} = L_{\text{有效}} \times d \quad (1)$$

其中  $L_{\text{有效}}$  和  $d$  分别表示 LET 有效值和粒子在灵敏体积中的径迹长度。LET 有效值为

$$L_{\text{有效}} = \frac{L}{\cos \theta}$$

其中  $\theta$  为入射方向与表面法线的夹角。

用于径迹长度的计算模型最初由 Pickel 和 Blandford<sup>[6]</sup>在 1978 年提出，而后逐步发展为经典 RPP 计算模型。模型中将计算所需的灵敏区定义为一个长方体盒状 ( $l, w, h$ )，并通过一系列的假定，从而简化对单粒子翻转率的计算，如图 2 所示。

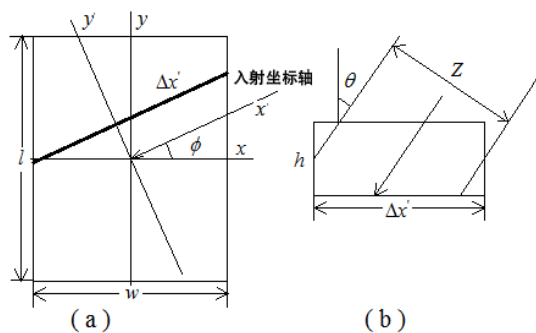


图 2 RPP 模型中的几何体（俯视图 a 与剖视图 b）

Fig. 2 The geometry of RPP model (top and cross-sectional view)

图 2 所示一个入射角为  $\theta$ 、 $\phi$  的粒子穿过灵敏区时的数学几何体。当一个半导体元器件处在空间辐射环境中发生单粒子翻转效应时，单粒子在轨翻转率可由下式（球坐标系中）表达<sup>[7]</sup>：

$$Rate(Z, A, E, \theta, \phi, \chi) = f(\chi) \sum \iiint \sigma_i(Z, A, E, \theta, \phi) D(Z, A, E, \theta, \phi) dE \sin \theta d\phi d\theta \quad (2)$$

式(2)中,  $f(\chi)$  为 RPP 模型中的几何尺寸参数函数。 $\sigma_i$  为单粒子翻转截面, 它与灵敏区内的沉积能量及临界电荷数有关, 当沉积量不足以发生单粒子翻转, 则  $\sigma_i = 0$ ; 反之, 则  $\sigma_i \neq 0$ 。 $D$  为原子数  $Z$ 、质量数  $A$  的高能粒子通量。由于  $LET$  值与粒子的  $Z$ 、 $A$  有关。计算的过程中, 考虑到空间环境中的真实性, 本文采用的原子序数为  $Z = 1 \sim 92$  的粒子, 具体  $LET$  曲线见图 1。

本文中, 基于 RPP 模型对单粒子翻转率计算的假设条件如下:

- 1) 在灵敏区体积内沉积的能量等于单能粒子穿过灵敏区时利用  $LET$  值计算的能量损失, 如式(1)。该假设对粒子在器件中射程较短的情况不一定成立, 主要因为二次电子的有限射程有可能导致粒子的损失能量部分超出灵敏体积。
- 2) 具有同样  $LET$  值的粒子发生的单粒子效应是等同的。该假定主要解决具有不同速度的同种离子具有相同的  $LET$  值, 但具有不同的径迹, 从而发生的单粒子效应不同的问题。
- 3) 由  $LET$  引起的离子径迹在灵敏区的变化可忽略。该假设排除了  $LET$  值相同, 但路径不同, 从而在同一体积内能量沉积量不同的情况。
- 4) 粒子通量在器件中各向同性, 因此  $LET$  曲线在各个方向产生的效应是等同的。

由于  $LET$  值与  $Z$ 、 $A$  和  $E$  有关及假设 1)、2) 和 3), 可将式(2)化简为:

$$Rate = f(\chi) \iiint \sigma_{有效}(L, \phi, \mu) D(L, \phi, \mu) \mu d\phi d\mu dL \quad (3)$$

其中  $\mu = \cos \theta$ ,  $\sigma_{有效} = \sigma / \mu$ 。

通过假设 4) 可将式(3)积分得到:

$$Rate = \pi f(\chi) \int \sigma_{有效}(L) D(L) dL \quad (4)$$

### 3. 单粒子翻转率计算及分析

#### 3.1 单粒子翻转率模型优化

对已测器件的单粒子翻转率计算进行如下优化: 当高能单个粒子进入到耗尽层时, 考虑到漏斗区的深度, 且漏斗区的深度表示如下:

$$F = \frac{\mu_N}{\mu_P} h \quad (5)$$

其中  $\mu_N$  和  $\mu_P$  分别表示半导体器件材料中电子与空穴的迁移率<sup>1</sup>,  $h$  表示耗尽层的深度 (一般来说, 根据器件阱区的厚度,  $h$  的选值为  $0 < h \leq 4\mu m$ )。故当粒子入射角度为  $\theta$  时, 式 (1) 为:

$$E_{沉积} = L_{有效} \times d = L_{有效} \times \left( \frac{h}{\cos \theta} + \frac{F}{\cos \theta} \right) \quad (6)$$

其中  $L_{有效} = L / \cos \theta$ 。

而对于单粒子翻转截面函数, 采用实验中已测器件的数据 Weibull 拟合函数:

$$\sigma_{有效} = \sigma_{饱和} \left\{ 1 - \exp\left[ -\frac{(L - L_{临界})}{W} \right]^s \right\} \quad (7)$$

其中  $\sigma_{饱和}$  和  $L_{临界}$  分别表示单粒子翻转的饱和截面和 LET 临界值,  $W$  和  $s$  表示 Weibull 函数的宽系数和形系数。

下表 1 所示即为计算使用的器件参数和实验的 Weibull 函数系数:

表 1 计算仿真过程中器件的已知参数及实验数据<sup>[7, 8]</sup>

Tab.1 Acquired quantificational Weibull Function parameters and experimental data in the computational simulation of Device SEU rates

器件型号	# of Address	# of Bits	截面积 ( $\sigma_{sat}$ ) cm <sup>2</sup> /bit	LET 阈值 ( ) MeV-cm <sup>2</sup> /mg	参数 W MeV-cm <sup>2</sup> /mg	参数 S
AMD 93422, BIPOLAR	256	4	3.7e-05	0.58	5.5	0.8
AMD 93L422, BIPOLAR	256	4	2.60e-05	0.6	4.4	0.7
Signetics82S212, BIPOLAR	256	8	8.70e-06	1	6	0.8
IDT 6116, NMOS	2048	8	3.17e-06	4.8	70	1.25
AMD 92L44, NMOS	4096	1	1.03e-04	0.8	25	2.5

### 3.2 计算结果及分析

利用式(4)、式(5)、式(7)及表 1 中的器件参数及实验数据, 针对不同尺寸参数的灵敏体积计算单粒子在轨翻转率。文<sup>[7]</sup>给出的试验观察值是在  $L > 2$  的情况, 对于  $L$  值存在不确定性。本文轨道参数选定的是  $L=6.6$ , 且当结果均乘以  $\pi$  常数, 与试验观察值的吻合度大。计算结果如下表 2:

表 2 灵敏区体积尺寸参数不同的单粒子翻转率计算结果及分析

Tab.2 Predicted On-orbit SEU rates and analysis on the condition of different sensitive volumes

Device	Observed (SEUs/bit/day) <sup>[7]</sup>	Sensitive Volume		Volume ( $\mu m^3$ )		
		$1 \times 1 \times 0.5$	$1 \times 1 \times 1$	$1 \times 1 \times 2$	$2 \times 2 \times 1$	$2 \times 2 \times 2$
					$2 \times 2 \times 2$	$2 \times 2 \times 4$

<sup>1</sup> 文中选取的掺杂浓度为  $6.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , 电子和空穴的迁移率分别为  $1320.0 \text{ cm}^2/\text{V s}$  和  $495.0 \text{ cm}^2/\text{V s}$ .

93422	$3.00 \times 10^{-4}$	$2.52 \times 10^{-4}$	$3.85 \times 10^{-4}$	$6.88 \times 10^{-4}$	$2.52 \times 10^{-4}$	$3.85 \times 10^{-4}$	$6.88 \times 10^{-4}$
93L422	$3.25 \times 10^{-4}$	$5.13 \times 10^{-4}$	$7.83 \times 10^{-4}$	$1.41 \times 10^{-3}$	$5.13 \times 10^{-4}$	$7.83 \times 10^{-4}$	$1.41 \times 10^{-3}$
82S212	$7.88 \times 10^{-5}$	$4.01 \times 10^{-5}$	$6.95 \times 10^{-5}$	$1.39 \times 10^{-4}$	$1.21 \times 10^{-4}$	$2.10 \times 10^{-4}$	$4.19 \times 10^{-4}$
IDT6116 <sup>[9]</sup>	$5.30 \times 10^{-6}$	$2.01 \times 10^{-6}$	$2.86 \times 10^{-6}$	$4.79 \times 10^{-6}$	$5.89 \times 10^{-6}$	$8.36 \times 10^{-6}$	$1.40 \times 10^{-5}$
92L44	$1.30 \times 10^{-5}$	$1.34 \times 10^{-5}$	$2.28 \times 10^{-5}$	$4.53 \times 10^{-5}$	$4.17 \times 10^{-5}$	$7.08 \times 10^{-5}$	$1.41 \times 10^{-5}$
Simulated/Observed Min		0.38	0.54	0.90	0.84	1.28	2.29
Simulated/Observed Max		1.58	2.41	4.33	3.21	5.45	10.81
Simulated/Observed Mean		0.87	1.37	2.55	1.66	2.68	5.08
Standard Deviation ( $\delta^2$ )		0.18	0.43	1.49	0.68	2.18	9.44

根据表 2 的仿真结果，从模拟值与试验观察值的比例可以看出，器件灵敏体积大小为  $1 \times 1 \times 0.5 \mu\text{m}^3$ 、 $1 \times 1 \times 1 \mu\text{m}^3$ 、 $2 \times 2 \times 1 \mu\text{m}^3$  时在轨翻转率与搭载试验结果具有较好的吻合度；此外，根据对仿真结果作标准方差的分析，在  $1 \times 1 \times 0.5 \mu\text{m}^3$  时的计算结果离散度最小，证明在  $1 \times 1 \times 0.5 \mu\text{m}^3$  时在轨翻转率的仿真结果好于其他灵敏体积。另一方面对于灵敏体积大小为  $2 \times 2 \times 4 \mu\text{m}^3$  时，仿真结果及方差显示与搭载试验结果误差较大，表明在单粒子在轨翻转率仿真研究中，该灵敏体积可取性特别小。

为了便于灵敏体积尺寸参数的研究，引入系数  $P$ ：

$$P = l/h \quad (8)$$

研究表明，当  $P \geq 1$  时，器件单粒子在轨翻转率的仿真与试验结果具有较好的吻合度。文中  $1 \times 1 \times 1 \mu\text{m}^3$  时，即  $P = 1$ ； $1 \times 1 \times 0.5 \mu\text{m}^3$  和  $2 \times 2 \times 1 \mu\text{m}^3$  时，即  $P = 2$ 。根据模拟值与观察值的比例均值及离散方差分析， $P \geq 1$  时上述三种灵敏体积的计算结果均与器件观察值有着较好的吻合度，从而验证了该结论。

基于微观物理机制的角度，产生该结论的主要原因是：1.  $P$  值越大，粒子穿过器件灵敏区时，由 LET 值变化引起的径迹变化越小；2. RPP 模型的运用是基于 LET 值在灵敏体积中恒定，即为一个常量的假设。当灵敏体积区越薄，LET 值的改变量越小，即 LET 值趋向为一个定值。

另外，表 2 中基于 RPP 模型的器件在轨翻转率计算仿真过程，漏斗深度随着灵敏体积的变化而变化，且漏斗深度对器件单粒子在轨翻转率的影响较大。事实上，对于特定的器件，当发生单粒子效应时，漏斗深度是个常量。据此对特定器件选取特定漏斗深度和灵敏体积并计算之，结果如图 3 所示。

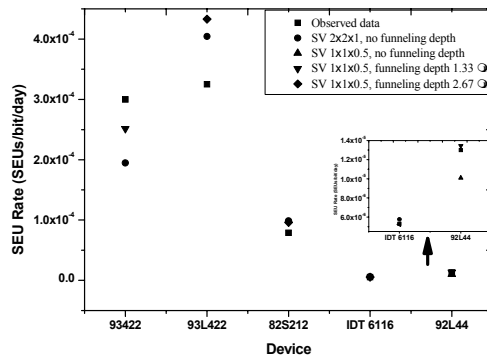


图 3 最优条件下器件的单粒子在轨翻转率

Fig. 3 The on-orbit single event upset rates prediction with the optimal condition

从图 3 看出, 经过优化, 特定器件单粒子在轨翻转率的仿真结果有了一定的改善: 器件 93422 和 92L44 在灵敏体积和漏斗深度分别为  $1 \times 1 \times 0.5 \mu\text{m}^3$  和  $1.33 \mu\text{m}$  时, 其在轨翻转率的预示结果最佳; 器件 82S212 和 IDT 6116 在灵敏体积和漏斗深度分别为  $1 \times 1 \times 0.5 \mu\text{m}^3$  和  $2.67 \mu\text{m}$  时, 其预示结果好于其他情况; 而器件 93L422 在  $2 \times 2 \times 1 \mu\text{m}^3$  及无漏斗深度时仿真结果较好。出现上述的情况, 主要是由于不同器件对应于不同的结构和掺杂浓度使得器件材料具有不同的电子与空穴的迁移率, 因而漏斗深度值选取异同。由此可见, 灵敏区体积大小和漏斗深度的选取对器件在轨翻转率仿真计算有着一定的影响。

#### 4. 结论

研究表明, 宇航半导体器件的在轨翻转率计算对器件灵敏区体积尺寸参数具有较为强烈的依赖性。采用 RPP 模型计算器件在轨翻转率时, 应考虑灵敏区体积尺寸参数  $P$  的大小。在耗尽层厚度  $0 < h \leq 4 \mu\text{m}$  前提下, 为减少灵敏区 LET 值的变化引起的系列误差, 选取  $P \geq 1$  时灵敏体积的 RPP 模型计算结果更加较为合理性和准确性, 而漏斗深度在仿真计算过程中应如何取舍和选用, 则更大程度上取决于特定器件的结构以及掺杂浓度等因素。

#### 参 考 文 献

- [1] D. Binder, E. C. Smith, and A. B. Holman. Satellite Anomalies from Galactic Cosmic Rays. IEEE Trans. Nuc. Sci, 1975, 22 (6): 2675–2680.
- [2] Michael Andrew Clemens, Nathaniel A. Dodds, Robert A. Weller et al. The Effects of Nuclear Fragmentation Models on Single Event Effect Prediction. IEEE Trans. Nuc. Sci, 2009, 56 (6): 3158–3164.
- [3] Kevin M. Warren, Robert A. Weller, Marcus H. Mendenhall et al. The Contribution

- of Nuclear Reactions to Heavy Ion Single Event Upset Cross-Section Measurements in a High-Density SEU Hardened SRAM, IEEE Trans. Nuc. Sci. 2005, 52 (6): 2125-2131.
- [4] Christina L. Howe, Robert A. Weller, Robert A. Reed et al. Role of Heavy-Ion Nuclear Reactions in Determining On-Orbit Single Event Error Rates. IEEE Trans. Nuc. Sci, 2005, 52 (6): 2182-2188.
- [5] P. E. Dodd, J. R. Schwank, M. R. Shaneyfelt et al. Impact of Heavy Ion Energy and Nuclear Interactions on Single-Event Upset and Latchup in Integrated Circuits. IEEE Trans. Nuc. Sci, 2007, 54 (6): 2303-2311.
- [6] J. C. Pickel, J. T. Blandford and Jr.. Cosmic ray induced errors in MOS memory cells. IEEE Trans. Nuc. Sci, 1978, 25 (6): 1166-1171.
- [7] E. L. Petersen, J. C. Pickel, J.H. Adams, Jr., and E. C. Smith. RATE PREDICTION FOR SINGLE EFFECTS ——a Critique. IEEE Trans. Nuc. Sci, 1992, 39 (6): 1577-1599.
- [8] Arthur B. Campbell, “SEU FLIGHT DATA FROM THE CRRES MEP,” IEEE Trans. Nuc. Sci, 1991, 38 (6): 1647-1654.
- [9] J. Liu, J. L. Duan, M.D. Hou et al. SEU ground and flight data in static random access memories. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2006, 245 (1) : 342-345.