

临近空间单粒子效应的数值模型和电路模拟

蔡理¹, 杨晓阔¹, 杨建军², 卢虎¹, 赵晓辉¹

(1. 空军工程大学理学院, 陕西 西安 710051; 2. 空军工程大学科研部, 陕西 西安 710051)

摘要 针对临近空间单粒子效应进行了数值模型仿真和特征尺寸为 $0.1 \mu\text{m}$ 的反相器电路的脉冲注入模拟研究。数值仿真结果表明器件临界电荷随着工作电压的降低而减小, 敏感横截面随着临界电荷的降低而逐渐增大。临近空间微电子器件的单粒子翻转概率随敏感横截面增大而上升, 但其又随临近空间高度的增加而下降。此外, 利用 SPICE 软件脉冲注入模拟观察到了反相器电路的单粒子翻转现象。所得结论有助于深入研究临近空间的单粒子效应并为器件抗辐射加固提供了理论依据。

关键词 临近空间; 单粒子效应; 临界电荷; 电路模拟; 反相器

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.02.016

中图分类号 V240.2; V417.6; X125 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)02-0076-05

临近空间是指距地面 20 - 100 km 的空域, 处于现有飞机的最高飞行高度和卫星的最低轨道高度之间^[1]。临近空间飞行器大量采用微电子器件构成的电路(如微处理器、存储器、功率器件等), 其负责空间仪器中的数据获取、处理和传输, 是整个临近空间飞行器的信息交互枢纽。但临近空间微电子器件易遭受到大量的宇宙射线粒子(主要是中子)辐射, 诱发越来越多的单粒子效应, 严重影响微电子器件的稳定性和可靠性。此外, 随着半导体工艺向超深亚微米方向发展, 微电子器件单粒子效应的特征和机理也变得复杂。先前的文献主要集中在低空和卫星高度的单粒子效应研究^[2-4], 而在临近空间高度, 单粒子效应的理论模拟和实验研究成果极少。为了能够清晰地认识临近空间单粒子效应的机理和其随微电子器件工艺变化的规律, 本文针对临近空间单粒子效应进行了数值模拟, 同时对特征尺寸为 $0.1 \mu\text{m}$ 的反相器电路进行了脉冲注入模拟研究。

1 临近空间单粒子效应计算模型

单粒子效应是微电子器件受到空间辐射环境的高能射线粒子与器件灵敏区域相互作用而引起的辐射损伤效应^[2], 主要包括单粒子翻转(SEU)和单粒子瞬态(SET), 这些效应均会引发逻辑错误。通常, 晶体管的PN结是灵敏区(PN结空间电荷区和少数在载流子扩张长度范围内的区域)。粒子在灵敏区内产生大量的电子-空穴对, 由于耗尽区的漂移运动和扩散区的扩散运动, 被PN结的N区和P区所收集, 或由于电荷形成的电流, 使器件产生软错误。不同空间位置引发电离作用的离子是不同的, 由于中子是临近空间的主要辐射源^[5], 因而文中主要针对中子引发的单粒子效应进行模拟研究。

实际上, 要发生单粒子效应, PN结收集的电荷必须超过一固定数值, 这个数值就是PN结的临界电荷, 只有超过临界电荷的电离作用才会使晶体管发生逻辑翻转和错误^[6-7]。临界电荷 Q_{CRIT} 的大小取决于晶体

* 收稿日期: 2010-12-13

基金项目: 空军工程大学科技创新计划资助项目(KGDCXJH0912)

作者简介: 蔡理(1959-), 女, 福建永春人, 教授, 博士生导师, 主要从事微纳电子器件的理论及应用、现代集成电路与系统等研究。E-mail: qianglicai@163.com

管电源电压 V_{CC} 和 P 型或 N 型漏极结电容 C_{node} , 其计算表达式为:

$$Q_{CRIT} \approx C_{node} V_{CC} \quad (1)$$

在得到临界电荷后, 临近空间器件对大气中子的敏感横截面为^[8]:

$$S_c(V_{CC}, A, Q_{CRIT}) = AP_{ENV}(V_{CC}, Q_{CRIT}(V_{CC}, s_{EFF}^-)) \quad (2)$$

式中: A 是漏极的面积; P_{ENV} 是小维度函数; s_{EFF}^- 为描述收集波形时间相关的参数。对一个给定的 V_{CC} 和漏极类型(P 型或 N 型), P_{ENV} 满足如下指数关系:

$$P_{ENV} = K \exp\left(-\frac{Q_{CRIT}}{Q_k}\right) \quad (3)$$

式中 K 为常数, 研究表明所有不同技术下 K 值相同; Q_k 为电荷收集斜率, 依据掺杂和 V_{CC} 变化。文献[8]给出了物理栅长(特征尺寸) $L_G = 0.6 \mu\text{m}$ 和电源电压 $V_{CC} = 5 \text{ V}$ 条件下的敏感横截面相关的参数。使用该经验模型时, 需要找出电荷收集斜率 Q_k 。假设基线技术为无偏置下的 $0.6 \mu\text{m}$ 技术。当掺杂外形改变时, Q_k 为在给定技术下的值乘上因子 f_U 。其次, 当电压从 0 V 增加到 V_{CC} 时, 则 Q_k 乘上因子 f_V 。 Q_k 变化式为:

$$Q_{k2} = \frac{f_{V2} f_{U2}}{f_{V1} f_{U1}} Q_{k1} \quad (4)$$

式中 Q_{k1} 和 Q_{k2} 分别为 2 个特征尺寸下的电荷收集斜率。

根据上面的分析, 由式(1)、式(3)和式(4)可以求出器件敏感横截面。现设中子通量为 F , 则临近空间的中子单粒子翻转率为:

$$R_{SEU} = FS_c \quad (5)$$

2 单粒子效应数值仿真

通过上面的推导, 得到了临界电荷和单粒子效应翻转率的相关模型, 下面将对不同技术的 CMOS 器件单粒子效应进行数值仿真。

2.1 临界电荷变化的仿真

由于器件的物理栅长在不断减小, 因此本文从器件的实际角度出发对其变化趋势进行了数值模拟, 选取结电容的典型值为 10 fF (选取的电容均为实际工艺下的数值), 此外还选取了 8 fF 和 5 fF 电容值。图 1 为临界电荷随工作电压和 PN 结电容变化的仿真结果。

从图 1 可见, 在 PN 结电容不变的条件下, 临界电荷随着工作电压的降低而减小, 如 2.5 V 下传统工艺 (10 fF) 的临界电荷为 25 fC ; 相同工作电压下, 随着工艺水平的提高, 临界电荷也呈现出下降的趋势。当然, 不断下降的临界电荷对器件抗单粒子翻转是不利的。

2.2 临近空间器件敏感横截面模拟

根据式(2)的推导可知横截面与晶体管漏区敏感面积和电荷收集斜率相关。从已有文献基线 $0.6 \mu\text{m}$ 技术 NMOS 和 PMOS 来看, 由于 Q_k 不等, 因此 N 掺杂和 P 掺杂的管子其临界电荷是不同的。随着技术的发展, 器件的技术已到了纳米级, 因此重点对主流技术 $0.1 \mu\text{m}$ 技术的敏感横截面进行了数值模拟, 器件工作电压为 1.2 V 。图 2 为模拟得到的基本 MOS 器件的敏感横截面随临界电荷的变化情况。

从图 2 可见, 任一临界电荷下, 临近空间中子对 NMOS 和 PMOS 场效应管的横截面并不相同。两者均随着临界电荷的降低而逐渐升高, 但 PMOS 变化显著, 而 NMOS 相对平缓。以 NMOS 为例, 在临界电荷为 14 fC 时, 大气中子横截面为 $0.4 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{bit}$; 当临界电荷下降到 5 fC 时, 大气中子横截面为 $0.79 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{bit}$, 增大了约 2 倍。但对于 PMOS, 在临界电荷为 14 fC 时的大气中子横截面为 $0.09 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{bit}$, 在临界电荷为 5 fC 时的大气中子横截面为 $0.46 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{bit}$, 增大了约 6 倍。大气中子横截面的增大, 意味着器件受影响的程度大, 更容易发生单粒子翻转。

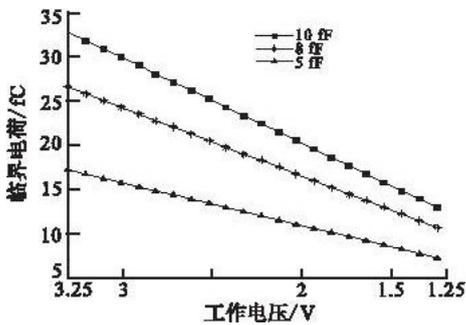


图1 临界电荷随工作电压 PN 结电容变化

Fig.1 The change of critical charge with supply voltage and PN junction capacitance

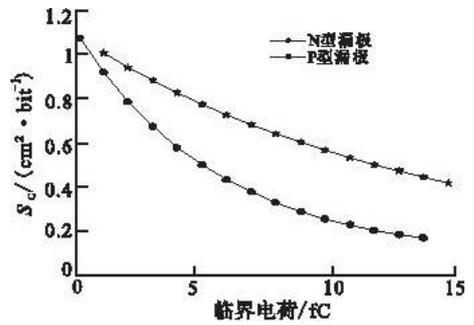


图2 敏感横截面随临界电荷的变化图

Fig.2 The change diagram of cross section with critical charge

2.3 临近空间的单粒子翻转率

通过上述分析,获得了微电子器件的临界电荷、临近空间器件敏感横截面等关键数据,它们产生的综合影响以微电子器件单粒子翻转率的形式出现。对器件在临近空间的单粒子翻转率进行估算见图3。

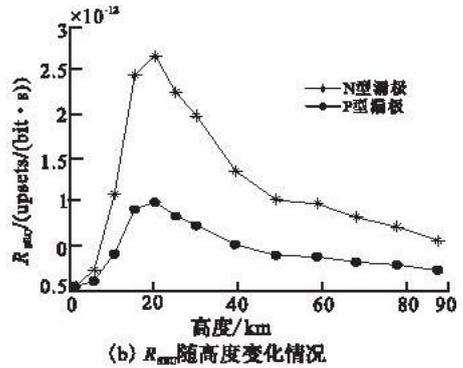
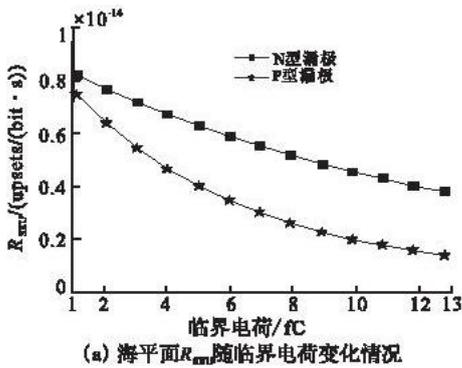


图3 海平面和临近空间的单粒子翻转率

Fig.3 Rate of single event upset in sea level and near space

从图3(a)可见 NMOS 和 PMOS 场效应管单粒子翻转率均对临界电荷敏感,但相同临界电荷时,PMOS 的翻转率略大于 NMOS,这与 NMOS 和 PMOS 的漏极扩散区面积不等有关。如临界电荷为 10 fC 时海平面 NMOS 的翻转率为 0.17×10^{-14} upset/(bit·s),而 PMOS 的翻转率为 0.34×10^{-14} upset/(bit·s)。图3(b)清晰反映了单粒子翻转随高度变化的情况,其随着高度的增加其值先增大再减小,但翻转率值比海平面的大得多,增加了约 2 到 3 个数量级。而在临近空间区域内,NMOS 和 PMOS 翻转率随高度增加而减小。以 NMOS 为例,其在临近空间下界 20 km 处翻转率值为 2.75×10^{-12} upset/(bit·s),而在 90 km 处,翻转率值下降到 0.7×10^{-12} upset/(bit·s)。

根据图3(b)中临近空间单粒子翻转率的数值可知,由于其在 18 km 处存在一最大翻转概率,因此对于即将进入临近空间的飞行器来说,18 km 附近的突防非常关键,这是器件极易发生单粒子翻转的时候,需要针对此进行加固设计。

3 单粒子效应脉冲注入模拟

为了对复杂电路的分析奠定基础,下面将对临近空间电子电路进行脉冲注入模拟以观察输出发生翻转的情况。以基本的电路单元 CMOS 反相器为例,通过瞬态脉冲注入^[9]观察其在中子撞击后的电流和电压响应。图4为反相器的电路结构图,图中 M2 为 PMOS,M1 为 NMOS,M2 和 M1 的漏极相连接, C_L 为反相器的负载电容, V_{DD} 为工作电压。

现假设中子撞击反相器的 NMOS 晶体管,因器件 PN 结会瞬间完成电荷收集,在 M1 的漏极形成脉冲,即电流脉冲。用 SPICE 软件进行注入模拟,即用指数电流源 $I_1(t) = I_P(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ (通过软件设定)代替撞击效应,从 M2 和 M1 的漏极注入电路,观察电路的 SET 脉宽和电压波形。其中, $V_{DD} = 2$ V,负载电容值为 $C_L =$

2.8 fF,注入电流脉冲 I_1 的 SPICE 模型参数为 $TD1 = TC1 = 0$,峰值电流为 $I_{1p} = 7$ mA, $TD2 = 2$ ps, $TC2 = 15$ ps。图5给出了反相器发生单粒子效应瞬态输出电压的变化曲线。从图中可见,反相器的功能输出随着脉冲的产生被改变。初始时,反相器的输入为低电平0(逻辑0状态),因此正常情况下其输出应为高点平2V(逻辑1),图5的起始电压反映了正确逻辑状态。但随着中子的入射,器件发生单粒子效应,NMOS的PN结收集电荷形成漏极瞬态电流,进而引起输出电压的突变。输出电平被拉低,反相器翻到0状态。因此在中子入射的瞬间,反相器失去了正确的功能。输出逻辑1翻转为错误的逻辑0。持续一段时间后,随着SET脉冲的消失,反相器功能恢复正确。其原因为:脉冲注入后,漏源电压 V_{DS} 增大,M2导通,等效一小的导通电阻 R_{on} ,同时M1截止,截止电阻很大,因而输出逻辑0状态。

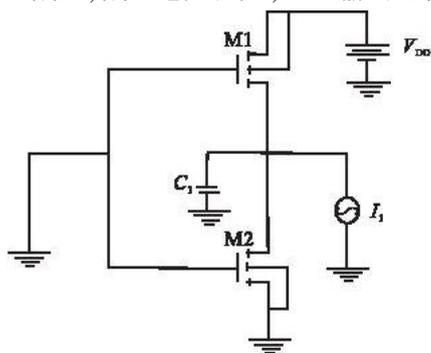


图4 反相器的注入模拟结构图

Fig. 4 Architecture for injection simulated in inverter

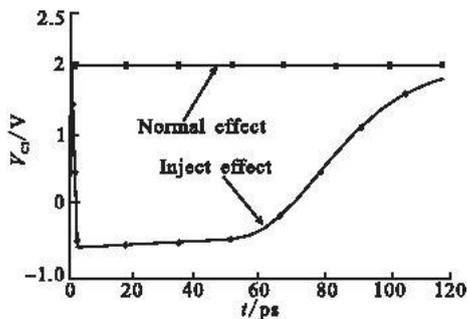


图5 反相器输出随注入脉冲的变化

Fig. 5 The change of output voltage in inverter with injected pulse

4 结论

本文从数值模型和电路仿真角度对临近空间单粒子效应进行了研究,得出以下结论:临界电荷随着工作电压的降低而减小,如2.5V下传统工艺($C_{node} = 10$ fF)的临界电荷为25 fC;相同工作电压下,随着工艺水平的提高,临界电荷也呈现出下降的趋势;临近空间微电子器件的单粒子翻转率随高度的增加而下降;采用PSPICE软件进行脉冲注入模拟观察到了反相器电路的逻辑位翻转现象。文中所得结论有助于对临近空间单粒子效应进行深入研究,为器件抗辐射加固和实验研究奠定了一定的理论基础。

参考文献:

- [1] Stephens H. Near - space [J]. Air force magazine, 2005, 88(7): 3 - 5.
- [2] Olsen J, Becher P E, Fynbo P B, et al. Neutron - induced single event upsets in static RAM observed at 10 km flight altitude [J]. IEEE transactions on nuclear science, 1993, 40(5): 74 - 77.
- [3] 张科营, 郭红霞, 罗尹虹, 等. 静态随机存储器单粒子翻转效应三维数值模拟[J]. 物理学报, 2009, 58(12): 8651 - 8656.
ZHANG Keying, GUO Hongxia, LUO Yinhong, et al. Three - dimensional numerical simulation of single event upset effects in static random access memory [J]. Acta physica sinica, 2009, 58(12): 8651 - 8656.
- [4] Radiation effect mitigation overview. [EB/OL]. [2010 - 10 - 11]. <http://www.xilinx.com/esp>.
- [5] 蔡明辉, 张振龙, 封国强, 等. 临近空间中子环境及其对电子设备的影响研究[J]. 装备环境工程, 2007, 4(5): 23 - 29.
CAI Minghui, ZHANG Zhenlong, FENG Guoqiang, et al. Study of near space neutron environment and its effects to electronic device [J]. Equipment environmental engineering, 2007, 4(5): 23 - 29.
- [6] Freeman L B. Critical charge calculations for a bipolar SRAM array [J]. IBM journal of research and development, 1996, 40(1): 119 - 129.
- [7] Messenger G C. Collection of charge on junction nodes from ion tracks [J]. IEEE transactions on nuclear science, 1982, 29(6): 2024 - 2026.
- [8] Hazucha P, Svensson C, Wender S A. Cosmic ray soft error rate characterization of a standard 0.6 μ m CMOS process [J]. IEEE journal of solid state circuits, 2000, 35(10): 1422 - 1429.

- [9] Wirth G I, Vieira M G, Neto E H, et al. Modeling the sensitivity of CMOS circuits to radiation induced single event transients [J]. *Microelectronics reliability*, 2008, 48(1): 29–36.

(编辑:徐敏)

Numerical and Circuit Simulations of Single Event Effects in Near Space

CAI Li¹, YANG Xiao-kuo¹, YANG Jian-jun², LU Hu¹, ZHAO Xiao-hui¹

(1. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Single event effect in near space is investigated via numerical model simulations and circuit simulation of inverter with feature size $0.1\mu\text{m}$. The numerical simulation results show that the critical charge of microelectronics device is decreased with supply voltage and the sensitive cross section is increased with the decrease of the critical charge, which leads to an increased single event upset rate in the device in near space, however single event upset rate is also decreased with the rising of the near space height. Moreover, the single event upset is observed in the inverter with SPICE circuit simulation by the pulse injection. The obtained results are helpful to performing a deeper study of the single event effect in near space and also provide a theory guide for radiation hardened.

Key words: near space; single event effect; critical charge; circuit simulation; inverter

(上接第 61 页)

Study of Laser Transmission Characteristics in Atmosphere by Simulation

FU Qiang, JIANG Hui-lin, WANG Xiao-man

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Atmospheric makes the receiver produce laser power attenuation, light intension scintillant beam excursion phenomenon. The operating performances of the laser communication, laser range finder systems and etc. are seriously limited. Now the commonly used theory and research methods in atmosphere transmission characteristics are all based on the research results of foreign countries. Therefore, the research on atmosphere characteristics in the laser transmission channel is very important and necessary. The theory model of the attenuation effect caused by atmosphere absorption, atmosphere scattering, and the effect model of atmospheric turbulence caused by strong light, drifting and expanding of beam and so on are established. Based on the analysis of the above each model, the simulations are focused on the theory model of atmospheric absorption and scattering, and on the effect model of the atmospheric turbulence on the laser transmission characteristics. The simulation results show that atmospheric absorption and scattering will cause power attenuation. Atmospheric jitter of laser speckles effect, beam bending and expanding will influence the tracking accuracy and precision ship-swaying alignment. The fluctuation of power by atmospheric turbulence will affect communication rate and bit error rate. Finally the research on the laser transmission characteristics in the atmosphere is prospected.

Key words: atmospheric; laser transmission characteristics; attenuation; turbulence