

互补金属氧化物半导体器件空间低剂量率辐射效应预估模型研究*

何宝平[†] 姚志斌

(西北核技术研究所, 西安 710613)

(2009 年 3 月 6 日收到; 2009 年 7 月 16 日收到修改稿)

给出了一种新的预估互补金属氧化物半导体器件(CMOS 器件)空间低剂量率辐射效应模型, 相对线性响应预估模型, 该模型在预估 CMOS 器件低剂量率辐射效应方面更接近实际试验结果, 且不同剂量率辐射试验结果证实了所建模型的正确性. 最后利用新建模型对处于空间低剂量率环境下 CMOS 器件的敏感参数进行了预估.

关键词: 电离辐射, 总剂量, 低剂量率, 预估方法

PACC: 6180E, 6170A

1. 引 言

根据实验室实验数据来预估器件空间辐射响应是抗辐射加固研究的目的, 国外在低剂量率辐射效应预估技术方面已经进行了多年的研究^[1-5], 它们可能被作为附加的加速退火方法出现在 MIL-STD-883D 1019.4^[6]方法、ESC/SCC 22900^[7]和它们的修订版中, 所有这些都是提供较保守的试验以便能够给抗辐射加固设计部门提供更多的信息. 在以往的研究中^[8], 人们对氧化物陷阱电荷模型主要是根据线性响应理论方法建立的. 在本文中, 主要采用概率的方式来描述氧化物陷阱电荷的俘获荷退火情况, 同时引进了慢界面态和空穴退火之间的线性联系, 建立辐射诱导氧化物陷阱电荷和界面态模型, 并利用模型进行空间环境效应预估.

2. 线性响应理论预估模型

研究表明^[9,10], MOS 器件的长时间退火特性满足如下的方程:

$$-\Delta V_0(t) = \frac{-A \ln(t/t_0) + c}{\gamma_0}, \quad (1)$$

$\Delta V_0(t)$ 是每单位剂量的瞬时退火曲线的漂移量, γ_0 是用来获得瞬时退火曲线的总剂量, A 是瞬时退火曲线斜率的大小, C 是 $t = t_0$ 的截距. 如果方程(1)对所有的感兴趣时间是正确的话, 那么, 能够通过积分剂量率和瞬时退火响应 ΔV_0 来预估辐射诱导阈值电压的漂移 $\Delta V_{th}(t)$, 即

$$\Delta V_{th}(t) = \int_0^t \dot{\gamma}(\tau) \Delta V_0(t - \tau) d\tau. \quad (2)$$

将方程(1)代入方程(2), 并且假设剂量率为常量 B (rad(Si)/s).

当 $X \leq 1$ 时,

$$-\Delta V_{th}(t) = Bt/\gamma_0 \{ -A [\ln(X) + \ln(t_E/t_0)] + A + C \}. \quad (3)$$

在 $X > 1$ 时,

$$-\Delta V_{th}(t) = Bt_E/\gamma_0 \left\{ -A \left[X \ln\left(\frac{X}{X-1}\right) + \ln(X-1) + \ln(t_E/t_0) \right] + A + C \right\}, \quad (4)$$

这里 $X = t/t_E$, t_E 是在剂量率 B (rad(Si)/s) 情况下的总的辐照时间 ($1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$).

* 国防预研基金(批准号:311060403)资助的课题.

[†] E-mail: baopinghe@126.com

3. 新建辐射效应预估模型

3.1. 氧化物陷阱电荷的建立

采用概率的方式描述氧化物陷阱电荷的俘获和退火过程,并假设不同空穴的退火过程是相互独立的,且氧化物陷阱电荷在时间 τ 时刻的分布可以通过概率 $p(\tau)$ 来描述. 那么 $p(\tau)\delta\tau$ 可以认为当陷阱俘获一个空穴后,在时间 $(\tau, \tau + \delta\tau)$ 时间范围内损失的电荷. 对于这些具有相同退火时间的陷阱,在辐照过程中的任何时刻,它们上面每单位面积占据空穴的数量 δN_p 可以通过一次动力学方程^[11]给出,即

$$\frac{d(\delta N_p)}{dt} = \frac{-(\delta N_p)}{\tau} + \gamma \Delta N_0 p(\tau) \delta\tau, \quad (5)$$

初始条件 $\delta N_p(t=0) = \delta N_{p0}$, ΔN_0 是单位脉冲总剂量辐射产生的电荷密度, $\langle \tau \rangle = \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \tau \cdot p(\tau) d\tau$, 对方程(5)进行积分,得到辐照过程中,产生的氧化物陷阱电荷随辐照时间的关系

$$\Delta N_{ot}(\gamma, t) = \gamma \Delta N_0 \langle \tau \rangle \times \left(1 - \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \frac{\tau p(\tau) \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)}{\langle \tau \rangle} d\tau \right), \quad (6)$$

τ_{\max} 和 τ_{\min} 是氧化物陷阱电荷的最大和最小退火时间, $\langle \tau \rangle$ 代表平均退火时间. 同样,退火过程,氧化物陷阱电荷随退火时间的关系可以从下式中得到:

$$\Delta N_{ot}(D, t) = \frac{D \Delta N_0}{t_{ir}} \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \tau \cdot p(\tau) \{ \exp[-(t - t_{ir})/\tau] - \exp(-t/\tau) \} d\tau, \quad (7)$$

D 为辐照过程中的总剂量.

假设 ΔN_{ot} 的概率 $p(t)$ 是与陷阱电荷退火的物理过程有关,我们考虑隧道效应,同时假设隧道产生的概率与陷阱到 Si-SiO₂ 界面的距离满足指数关系,概率 $p(t)$ 可以通过下式给出:

$$p(\tau) = \frac{1}{\tau \ln(\tau_{\max}/\tau_{\min})},$$

且

$$\langle \tau \rangle = (\tau_{\max} - \tau_{\min}) / \ln(\tau_{\max}/\tau_{\min}). \quad (8)$$

将方程(8)代入方程(6)中,并且假设 $\tau_{\max} \gg \tau_{\min}$, 经计算得到

$$\begin{aligned} \Delta N_{ot}(\gamma, t) &= \frac{\gamma \Delta N_0 \tau_{\max}}{\ln(\tau_{\max}/\tau_{\min})} \\ &\times \left\{ 1 - \frac{1}{\tau_{\max} \tau_{\min}} \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \exp(-t/\tau) d\tau \right\} \\ &= \frac{\gamma \Delta N_0 \tau_{\max}}{\ln(\tau_{\max}/\tau_{\min})} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\max}}\right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{t}{\tau_{\max}} Ei\left(-t/\tau_{\max}\right) \right\}, \quad (9) \end{aligned}$$

其中 $Ei(x) = \int_{-\infty}^x e^t \frac{1}{t} dt$ 为指数积分, $Ei(x) = c + \ln(x) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n \cdot n!}$, $c=0.577215$ 为欧拉常数. 利用指数积分和指数泰勒展开,最终得到在辐照过程中,氧化物陷阱电荷与辐照时间关系

$$\begin{aligned} \Delta N_{ot}(\gamma, t) &= \frac{\gamma \Delta N_0 t}{\ln(\tau_{\max}/\tau_{\min})} \\ &\times [1 - c + \ln(\tau_{\max}/t)], \\ &t < t_{ir}. \quad (10) \end{aligned}$$

采用同样的分析方法,将方程(8)代入方程(7)中,并利用指数积分和指数泰勒展开,得到退火过程中氧化物陷阱电荷随时间的关系式

$$\begin{aligned} \Delta N_{ot}(\gamma, t) &= \frac{\gamma \Delta N_0 t_{ir}}{\ln(\tau_{\max}/\tau_{\min})} \left\{ 1 - c - (1 - t/t_{ir}) \right. \\ &\quad \left. \times \ln\left(1 - \frac{t_{ir}}{t}\right) + \ln\left(\frac{\tau_{\max}}{t}\right) \right\}, \\ &t > t_{ir}. \quad (11) \end{aligned}$$

最终对方程(10)和(11)进行简单的形式变化得到

$$\Delta N_{ot} = \begin{cases} \gamma t_{ir} (AX + B), & t > t_{ir}, \\ \gamma t [B - A \ln(t/t^*)], & t < t_{ir}, \end{cases} \quad (12)$$

其中 $X = (t/t_{ir} - 1) \ln(1 - t_{ir}/t) - \ln(t/t^*)$, $A = \frac{\Delta N_0}{\ln(\tau_{\max}/\tau_{\min})}$, $B = A[1 - c + \ln(\tau_{\max}/t^*)]$, t 为时间单位比例(例如, $t^* = 1$ s).

3.2. 界面态电荷模型建立

为了获得界面陷阱密度建立的模型,假设在 MOS 结构中慢界面态增长与氧化物陷阱电荷退火数量是成比例的,并且界面态的增加与吸收的总剂量成比例,得到界面态陷阱电荷密度 ΔN_{it} 随剂量和时间的关系

$$\Delta N_{it} = (\Delta N_i + K_{oi} \Delta N_0) D - K_{oi} \Delta N_{ot}(\gamma, t), \quad (13)$$

式中 ΔN_i 是一常数, K_{oi} 是转换因子, 它表示氧化物陷阱电荷转换为界面态的数量, 将氧化物陷阱电荷模型表达式代入方程 (13) 并按照 (12) 式的形式进行简单的变形

$$\Delta N_{it} = \begin{cases} D(A_{ni}X + B_{ni}), & t > t_{ir}, \\ \gamma t [B_{ni} - A_{ni} \ln(t)] , & t < t_{ir}, \end{cases} \quad (14)$$

式中 $A_{ni} = -K_{oi}A$, $B_{ni} = \Delta N_i + K_{oi}(\Delta N_0 - B)$, $X = (t/t_{ir} - 1) \ln(1 - t_{ir}/t) - \ln(t/t^*)$, t 为时间单位比例 (例如, $t^* = 1$ s).

3.3. 总剂量辐射敏感参数预估模型

假设 MOSFET 器件氧化物陷阱电荷和界面态的建立仅仅是总剂量的物理效应, 且辐射敏感参数 p 的变化线性依赖 ΔN_{oi} 和 ΔN_i , 那么, 当 p 改变 Δp 时有

$$p = p_0 + c_1 \Delta N_{oi} + c_2 \Delta N_{it}. \quad (15)$$

将方程 (12) 和 (14) 代入可以得到

$$\Delta p = \begin{cases} D(A_p X + B_p), & t > t_{ir}, \\ \gamma t [B_p - A_p \ln(t)] , & t < t_{ir}, \end{cases} \quad (16)$$

$$c_1 = dp/d(\Delta N_{oi}), \quad c_2 = dp/d(\Delta N_{it}),$$

其中

$$\begin{aligned} A_p &= A [dp/d(\Delta N_{oi}) - K_{oi} dp/d(\Delta N_{it})], \\ B_p &= B dp/d(\Delta N_{oi}) \\ &+ [\Delta N_i + K_{oi}(\Delta N_0 - B)] dp/d(\Delta N_{it}). \end{aligned} \quad (17)$$

利用方程 (16) 可以进行辐射效应敏感参数预估研究.

4. 总剂量辐射效应预估

总剂量电离辐射会诱导 CMOS 器件阈值电压发生漂移, 通常将 ΔV_{th} 分成两部分: 氧化物陷阱电荷引起的漂移 (ΔV_{oi}) 和界面态引起的漂移 (ΔV_{it}), 它可表示为氧化物陷阱电荷和界面态的形式, 即

$$\Delta V_{th} = c_1 \Delta N_{oi} + c_2 \Delta N_{it}. \quad (18)$$

按照 (16) 式可以进行阈值电压漂移预估.

另外, 总剂量电离辐射会引起 CMOS 器件迁移率的变化, 迁移率的变化与氧化物陷阱电荷密度和界面态电荷密度有关^[12],

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{1}{1 + c_1 \Delta N_{oi} + c_2 \Delta N_{it}}. \quad (19)$$

将方程 (12), (14) 代入方程 (19) 得到

$$\mu' = \begin{cases} D(A_p X + B_p), & t > t_{ir}, \\ \gamma t [B_p - A_p \ln(t)] , & t < t_{ir}, \end{cases} \quad (20)$$

式中 $\mu' = \frac{\mu_0}{\mu} - 1$, c_1, c_2, A_p 和 B_p 的定义同 (17) 式, 利用 (20) 式可以进行迁移率的预估.

图 1 给出了在 0.001 rad(Si)/s—50 rad(Si)/s 范围内, 新建模型和线性响应模型理论预估结果比较情况, 其中两种模型的参数是根据 44 rad(Si)/s 剂量率辐照 CC4007RHA NMOSFET 器件 1×10^5 rad(Si) 总剂量, 常温退火 175 h 确定的.

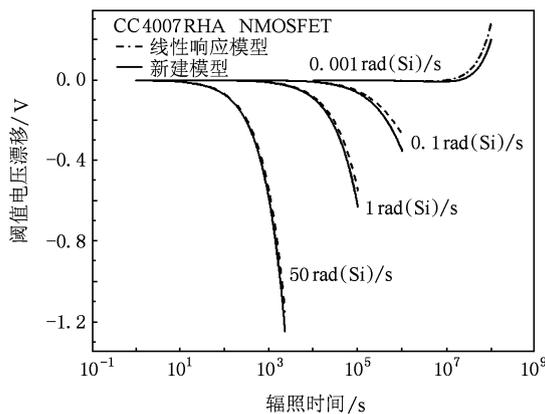


图 1 不同剂量率辐射下, 两种模型预估结果比较

从图 1 中两种模型的预估结果来看, 高低剂量率辐射损伤效应规律并不一致. 究其损伤机理来讲, 低剂量率辐射下的效应是氧化物陷阱电荷随时间的增加产生的退火效应与界面陷阱电荷随时间的增加而增长效应的综合. 在高剂量率下, 失效主要由氧化物陷阱电荷引起的阈值电压负向漂移引起; 在剂量率适中的情况, 氧化物陷阱电荷量一定程度的下降, 界面陷阱则一定程度的增加, 两者的效应可能会抵消; 在极低剂量率条件下, 氧化物陷阱电荷退火明显, 界面陷阱大量产生, 从而引起阈值电压的正向漂移, 进而产生失效. 不同剂量率下的效应不同, 主要是氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷的贡献有差异.

另为, 从图 1 中看出, 在误差允许的范围内, 预估高剂量率辐射效应时, 两种模型的预估结果比较接近, 但是在预估低剂量率辐射效应时二者差别较大. 那么, 在预估器件空间辐射效应时, 究竟那一种模型更比较真实反映器件的辐射损伤情况.

图 2 给出了在 0.1 rad(Si)/s, 44 rad(Si)/s 辐照下, 线性响应模型和新建模型的预估结果与试验

数据的比较情况,从图 2 中可以看出,在 44 rad (Si)/s 辐射下,两种模型的预估结果比较接近试验数据,但在 0.1 rad(Si)/s 剂量率辐射下,新建模型的预估结果更接近实际的试验数据。

为了进一步验证新建模型的有效性,本文利用新建的模型预估了 CC4007RHA 器件在 0.1,1,2.3,31 以及 90.2 rad/s 五种剂量率辐照下的总剂量效应,并给出了与试验数据的对比情况,结果如图 3 所示。

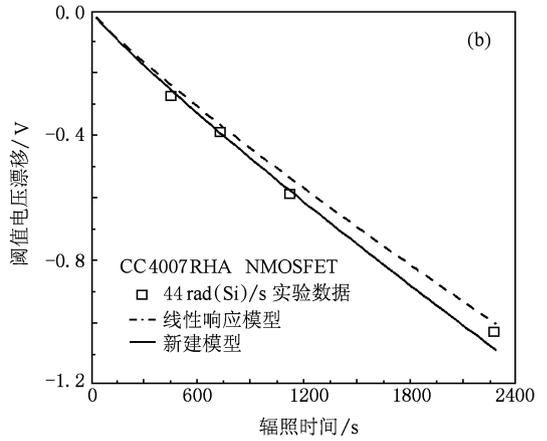
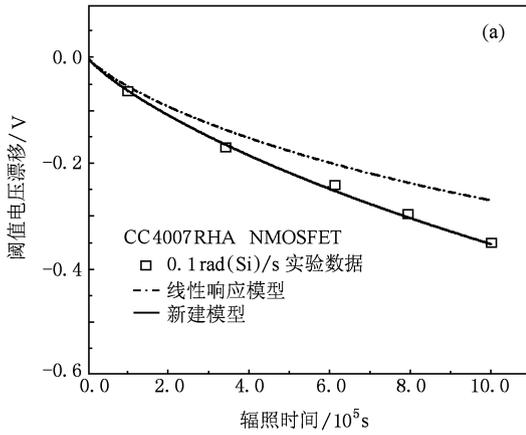


图 2 两种模型预估结果与试验数据的比较 (a) 0.1 rad(Si)/s; (b) 44 rad(Si)/s

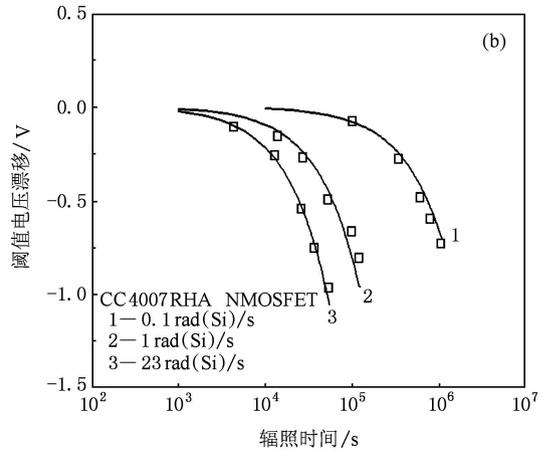
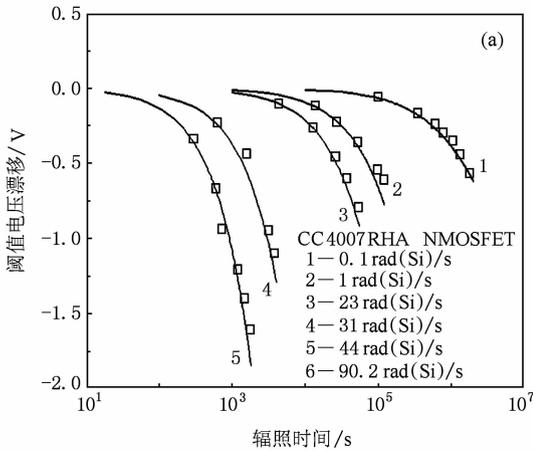


图 3 不同剂量率辐射下,理论预估结果与试验数据的比较 (a) NMOSFET; (b) PMOSFET

从图 3 中看出, NMOSFET 和 PMOSFET 晶体管随辐射时间的增加阈值电压发生负向漂移,分析其原因,对于 NMOSFET 晶体管而言,辐射感生氧化物陷阱电荷能够引起阈值电压发生负向漂移,但界面态会导致阈值电压发生正向漂移,最终 NMOSFET 器件阈值电压发生漂移的方向,主要依赖于那一种辐射感生电荷占主导作用. 图 3 中 NMOSFET 器件在五种剂量率辐射下,辐射感生氧化物陷阱电荷起主导作用,所以器件的阈值电压发生负向漂移. 对 PMOSFET 晶体管而言,辐射感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷所起的作用是同向的,均使阈值电

压发生负向漂移。

另为从图中看出,在 0.1—90.2 rad/s 剂量率范围内,新建模型的预估结果和试验数据符合得很好,这进一步证明了新建模型在预估 CMOS 器件在不同剂量率辐射下总剂量效应的可行性。

以上通过理论预估与具体试验相结合的办法,证明了新建模型在预估总剂量辐射效应方面的可行性. 我们可以在较短的时间内做效应模拟实验,利用新建的模型能够将结果外推到长时间的条件。

下面给出利用新建模型预估 CC4007RH 器件在空间环境(0.001 rad(Si)/s)下的总剂量辐射响

应情况, 结果见图 4. 图 4(a), (b) 分别给出了 CC4007RH 器件在空间环境中, 阈值电压漂移、迁移率随辐射时间的变化情况. 图 4(a) 中 NMOSFET 器件阈值电压发生正向漂移, 说明在 $0.001 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$

剂量率辐射下, 当累积剂量达到 $1 \times 10^7 \text{ rad}(\text{Si})$ 左右时, 辐射感生的界面态起主导作用, 界面态的作用大于氧化物陷阱电荷, 最终导致阈值电压发生正向漂移.

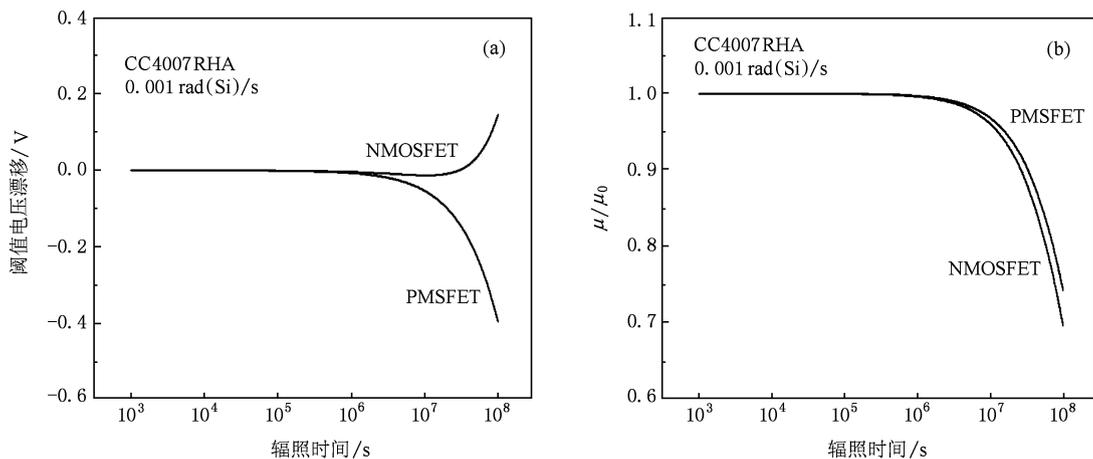


图 4 理论预估空间低剂量率环境下, 敏感参数随辐射时间的变化 (a) 阈值电压; (b) 迁移率

5. 结 论

在研究 CMOS 电路不同剂量率辐射下的总剂量效应时, 考虑到实际采用剂量率模拟辐射试验消耗时间、经费等因素, 本文给出了一种较为准确的

CMOS 器件总剂量效应预估模型. 该模型相对线性响应理论模型, 在高剂量率辐射下二者预估结果差别不大, 但在低剂量率辐射下的预估结果更接近实际试验数据, 这样我们可以在实验室内采用高剂量率在较短的时间内做效应模拟试验, 然后利用新建的模型将结果外推到长时间的条件.

[1] Brown D B, Johnston A H 1987 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **34** 1720
 [2] Stapor W J, Meyers J P, Kinnison J D, Carkuff B G 1992 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **39** 1876
 [3] Pavan P, Tu R H, Minami ER 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **41** 2619
 [4] Zhang T Q, Liu J L, Li J J, Wang J P, Zhang Z X, Xu N J, Zhao Y F, Hu Y H 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 2299 (in Chinese)
 [张廷庆、刘家璐、李建军、王剑平、张正选、徐娜军、赵元富、胡浴红 1999 物理学报 **48** 2299]
 [5] He B P, Wang G Z, Zhou H, Gong J C, Luo Y H 2003 *Acta phys. Sin.* **52** 188 (in Chinese) [何宝平、王桂珍、周辉、龚建成、罗尹虹 2003 物理学报 **52** 188]

[6] MIL-STD 883D Test method 1019. 4, issued January 1992 by the Defense electronics support center, Dayton, OH.
 [7] Carriere T, Beaucour J, Gach A 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **42** 1567
 [8] Winokur P S 1982 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **29** 2102
 [9] Winokur PS, Kerris K G, Harper L 1983 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **30** 4326
 [10] Schrimpf R D, Wahle P J 1988 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **35** 1536
 [11] Shvetzov-Shilovsky I N, Belyakov V V, Cherepko S V 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **43** 3182
 [12] Zupac D, Galloway K F, Schrimpf R D 1993 *J. Appl. Phys.* **77** 2910

Research on prediction model of radiation effect for complementary metal oxide semiconductor devices at low dose rate irradiation in space environment*

He Bao-Ping[†] Yao Zhi-Bin

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710613, China)

(Received 6 March 2009; revised manuscript received 16 July 2009)

Abstract

A new model is presented to predict the radiation response for complementary metal oxide semiconductor (CMOS) devices at low dose rate in space environment. In comparison with the linear system response theory model, the prediction results for CMOS devices at low dose rate radiation by using the new model are more close to actually experiment data, and the experimental results for different dose rate of radiation verify the accuracy of the model. Finally, the radiation effects on sensitive parameters of CMOS devices at low dose rate in space environment are predicted by making use of the new model.

Keywords: ionizing radiation, total dose, low dose rate, prediction method

PACC: 6180E, 6170A

* Project supported by the National Defense Pre-research Foundation of China (Grant No. 311060403).

[†] E-mail: baopinghe@126.com