

CMOS 器件总剂量辐射响应理论模拟

何宝平^{1,2}, 周荷琴¹, 郭红霞², 贺朝会², 周辉², 罗尹虹², 张凤祁²

(1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要:利用线性响应理论模型模拟 C4007B、CC4007RH 和 CC4011 器件受不同 γ 射线剂量率辐射时的总剂量效应。研究表明,辐射响应与吸收剂量成线性关系时,在实验室选用任一特定剂量率进行总剂量辐射和辐照后室温退火,可以通过线性响应理论模拟其它剂量率辐射下的总剂量效应。理论模拟结果与实际不同剂量率辐射实验结果符合得很好。

关键词:辐射响应;退火;剂量率

中图分类号:TN386.1

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2006)04-0486-04

Theoretic Simulation for CMOS Device on Total Dose Radiation Response

HE Bao-ping^{1,2}, ZHOU He-qin¹, GUO Hong-xia², HE Chao-hui²,
ZHOU Hui², LUO Yin-hong², ZHANG Feng-qi²

(1. *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*

2. *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

Abstract: Total dose effect is simulated for C4007B, CC4007RH and CC4011 devices at different absorbed dose rate by using linear system theory. When irradiation response and dose are linear, total dose radiation and post-irradiation annealing at room temperature are determined for one random by choosing absorbed dose rate, and total dose effect at other absorbed dose rate can be predicted by using linear system theory. The simulating results agree with the experimental results at different absorbed dose rate.

Key words: irradiation response; anneal; absorbed dose rate

CMOS 器件或电路的辐射效应模拟实验一般采用⁶⁰Co γ 射线源,剂量率范围为 0.02~2.5 Gy/s(以 Si 计,全文同)。研究表明^[1-3],MOS 器件和电路的辐射效应受辐射剂量、剂量率、偏置、温度以及工艺条件的影响。为得到器件在不同剂量率环境下响应的有用信息,必须进行大量的辐射模拟实验,同时还必须考虑器

件的退火效应。针对室温退火,国外已有较为成熟的线性响应理论。基于这一理论,可在较短时间内进行效应模拟实验,然后将实验结果外推到较长时间条件下。

本工作对不同类型国产 CMOS 器件进行总剂量辐射实验,然后根据不同剂量率下的实验数据,利用线性响应理论进行理论模拟研究。

1 样品电离辐射实验

样品电离辐射实验在 ^{60}Co γ 射线源上进行。 γ 射线剂量率利用 $\text{CaF}_2 : \text{Mn}$ 热释光剂量片进行测量。

实验所用样品为:加固型 CC4007RH CMOS 倒相器,选择的 γ 射线辐射剂量率分别为 1、10、23、310、440、910 mGy/s;市售非加固 C4007B 和 CC4011 CMOS 电路,选择的 γ 射线辐射剂量率为 0.6、2、527 mGy/s。

辐射和退火偏置条件为 $V_{\text{GS}} = V_{\text{DD}} = +5\text{ V}$, $V_{\text{SS}} = 0\text{ V}$ 。

退火实验所选择的条件列于表 1。

表 1 CMOS 电路在不同剂量辐照下的退火条件
Table 1 Anneal conditions at different absorbed dose rate for different CMOS devices

| CMOS 电路 | γ 剂量率/ (mGy · s ⁻¹) | 总剂量/ Gy | 退火 温度/°C | 退火 时间/h |
|----------|---|------------|-------------|------------|
| CC4007RH | 440 | 1 000 | 25 | 175 |
| C4007B | 0.6 | 89.99 | 25 | 1 746 |
| | 2 | 68.70 | 25 | 1 087 |
| | 527 | 63.24 | 25 | 168 |
| CC4011 | 0.6 | 185.42 | 25 | 1 746 |
| | 2 | 177.36 | 25 | 1 089 |

辐照前后及退火过程中的曲线测量和参数提取通过由计算机、HP4156A 半导体精密参数分析仪、HP3488A 程控开关、器件测试架组成的半导体参数自动化测量系统完成,并确保每次测量在半小时内完成。

2 响应理论模型

研究证实,CMOS 器件的辐射效应受辐射剂量、辐射剂量率、辐射时间、温度、生产工艺等因素影响。其中,辐射剂量率对辐射效应的影响尤为重要。受不同的剂量率辐射后,器件的失效机理和失效水平是不同的。研究表明^[4-7],MOS 器件的长时间退火特性满足如下方程:

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

式中: $\Delta V_0(t)$ 是每单位剂量的瞬时退火曲线的漂移量; t_0 是用来获得瞬时退火曲线的辐照时间; γ_0 是获得瞬时退火曲线的总剂量; A 是瞬时退火曲线斜率; C 是 $t = t_0$ 时的截距。

如果式(1)在所有感兴趣的时间内是正确的,则可通过积分剂量率和瞬时退火响应 ΔV_0 来计算辐射诱导阈值电压的漂移 $\Delta V_{\text{th}}(t)$,有:

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

其中: $\dot{\gamma}$ 为器件辐射剂量率,假设为常量 B ; τ 为积分变量; t 为常量。

将式(1)代入式(2)积分,得:

在 $X < 1$ 时,有

$$-\Delta V_{\text{th}}(t) = Bt/\gamma_0 \cdot$$

$$\{-A[\ln X + \ln(t_E/t_0)] + A + C\} \quad (3)$$

在 $X > 1$ 时,有

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

式中: $X = t/t_E$, t_E 是在剂量率 B 下总的辐照时间,为常量; t 是变量,当 $X < 1$,即 $t < t_E$ 时, t 为 CMOS 器件在剂量率 B 辐照下的辐照时间;当 $X > 1$,即 $t > t_E$ 时, t 为 CMOS 器件经剂量率 B 辐照后室温条件下的退火时间。

利用式(3)可对 CMOS 电路总剂量辐射数据进行理论模拟,利用式(4)能够对 CMOS 电路的 25 °C 下长时间退火效应进行理论模拟。

3 理论模拟结果

实验研究表明,CMOS 电路阈值电压漂移与辐射剂量和退火时间呈线性关系,满足线性响应理论应用的要求。图 1 示出利用某一特定剂量率辐照下的 25 °C 退火曲线确定式(3)和(4)中的常数 A 和 C 。根据图 1 所示方法,对在不同剂量率辐照下的 CMOS 电路,所确定的常数 A 和 C 的值列于表 2。

利用线性响应理论预估了 C4007B、CC4011 电路在不同辐射环境中的阈值电压漂移随辐射时间的变化关系,结果示于图 2。从图 2a、b(按 527 和 2 mGy/s 下的实验数据预估不同剂量率下的效应)可看出,在不同剂量率辐射下,器件阈值电压的漂移程度有异;在相同的总剂量下,阈值电压的漂移量随辐射剂量率的升高而增大;不同剂量率下的效应差异主要归因于氧化物陷阱电荷和界面态陷阱的贡献不

同,模拟结果与实验结果符合极好,据此可预估变化剂量率辐射下的总剂量效应。

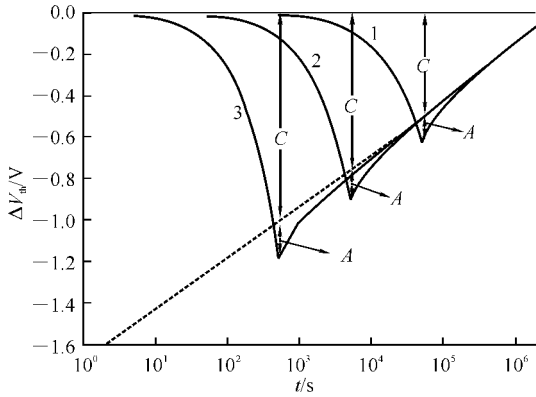


图1 线性响应理论模型中参数 A 和 C 的确定
Fig.1 Determination of constants A and C for linear system theory
剂量率, Gy/s: 1——0.02; 2——0.2; 3——2

表2 3种 CMOS 电路在不同吸收剂量率辐照下所确定的常数 A 和 C

Table 2 Determination of constants A and C for 3 kinds of CMOS devices at different absorbed dose rate

| CMOS 电路 | γ 剂量率/(mGy·s ⁻¹) | A | C |
|----------|-------------------------------------|-------|-------|
| CC4007RH | 440 | 0.12 | 0.877 |
| C4007B | 0.6 | 0.118 | 1.062 |
| | 2 | 0.072 | 0.968 |
| | 527 | 0.064 | 1.18 |
| CC4011 | 0.6 | 0.09 | 1.36 |
| | 2 | 0.08 | 1.36 |

利用线性响应理论预估在 1~910 mGy/s 剂量率范围内 CC4007RH 器件阈值电压漂移随辐射时间的变化(图 2c, 按 440 mGy/s 下的实验数据预估不同剂量率辐射下的效应)。图 2c 所示结果进一步证实了用线性响应理论预估器件总剂量效应的可行性。

用线性响应理论模拟非加固 C4007B、非加固 CC4011 和加固 CC4007RH 器件从空间到核爆环境(0.2 mGy/s~2 Gy/s)下的总剂量效应(图 3)。由图 3 可见,对于非加固 C4007B 和 CC4011 器件,在何种剂量率下辐照,器件的阈值电压漂移量均随辐射剂量增大负向增加,未观测到低剂量率辐照下“反弹”现象的发生。因此,对于处在空间到核爆环境下的非加固 CMOS 电路而言,辐射感生氧化物陷阱电荷是器件失效的主要原因。从图 3 可观察到低剂量率辐射下的“反弹”现象。因此,在空间低剂量率辐射环境下,辐射感生界面陷阱电荷是造成 CC4007RH 电路失效的主要原因,而在核爆环境中导致电路失效的主要原因则是辐射感生氧化物陷阱电荷。

4 结论

研究 CMOS 电路在不同剂量率辐射下的总剂量效应时,采用实际剂量率模拟辐射实验消耗时间、经费,因此,可对被研究器件在实验室采用任一剂量率(20 mGy/s~1 Gy/s)下进行总剂量辐照和室温退火,然后再用线性响应理论预估任意剂量率辐射下的总剂量效应。利

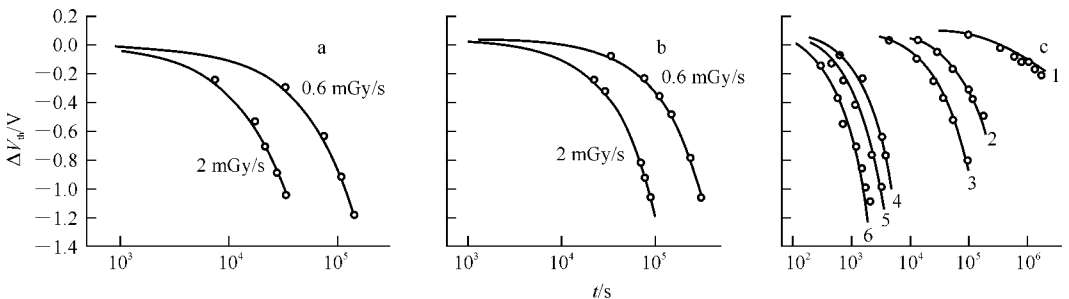


图2 不同剂量率辐射下 CMOS 器件的 ΔV_{th}

Fig.2 Simulating results of ΔV_{th} for different devices at different absorbed dose rate
实线——线性理论计算值;○——实验值

a——C4007B; b——CC4011; c——CC4007RH

剂量率, mGy/s: 1——1; 2——10; 3——23; 4——310; 5——440; 6——910

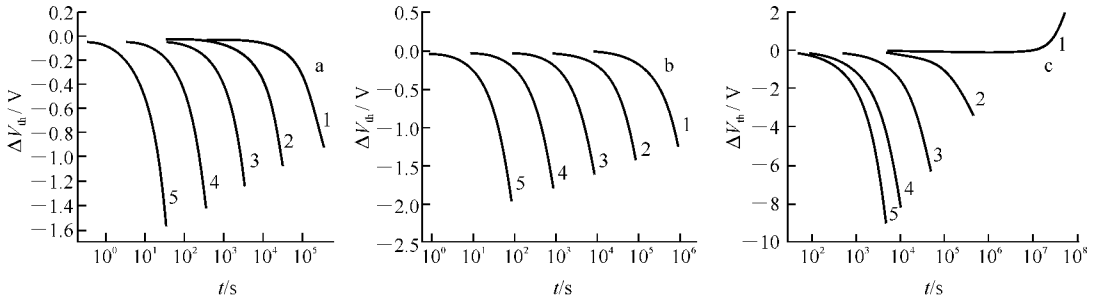


图3 不同剂量率辐射下总剂量效应的线性响应理论模拟

Fig. 3 Total dose effect simulation

by using linear system theory at different absorbed dose rate

a—C4007B,总剂量为 68.7 Gy,辐射剂量率($\text{mGy} \cdot \text{s}^{-1}$):

1—0.2,2—2,3—20,4—200,5—2 000;

b—CC4011,总剂量为 180 Gy,辐射剂量率($\text{mGy} \cdot \text{s}^{-1}$):

1—0.2,2—2,3—20,4—20,5—2 000;

c—CC4007RH,总剂量为 10 kGy,辐射剂量率($\text{mGy} \cdot \text{s}^{-1}$):

1—0.2,2—20,3—200,4—1 000,5—2 000

用线性响应理论能够给出器件参数与时间变化的详细信息,这一点与美军标标准测试程序有所不同。但必须指出,在未完全了解电路的失效机理和模拟电路的工作条件下,线性响应理论不能用来预估器件在空间环境下的功能失效。

参考文献:

[1] 张廷庆,刘家璐,李建军,等. BF_2^+ 注入加固硅栅 PMOSFET 的研究[J]. 物理学报, 1999, 48(12):2 299-2 303.
ZHANG Tingqing, LIU Jialu, LI Jianjun, et al. Effect of BF_2^+ implanted in hardened Si gate PMOSFET[J]. Acta Phys Sin, 1999, 48(12): 2 299-2 303(in Chinese).

[2] 范隆,任迪远,张国强,等. PMOS 剂量计的退火特性[J]. 半导体学报, 2000, 21(4):383-387.
FAN Long, REN Diyuan, ZHANG Guoqiang, et al. Annealing characteristics of PMOS dosimeters[J]. Chin J Semicond, 2000, 21(4):383-387 (in Chinese).

[3] 何宝平,王桂珍,周辉,等. NMOS 器件不同剂量率 γ 射线辐射响应的理论预估[J]. 物理学报, 2003, 52(1):188-191.
HE Baoping, WANG Guizhen, ZHOU Hui, et al. Predicting NMOS device radiation response at different dose rate in γ -ray environment[J]. Acta Phys Sin, 2003, 52(1): 188-191(in Chinese).

[4] DERBENWICK G F, SANDER H H. CMOS hardness prediction for low-dose-rate environments[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1977, 24: 2 244-2 247.

[5] WINOKUR P S, BOESCH H E. Interface-state generation in radiation-hard oxides [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1980, 27:1 647-1 650.

[6] WINOKUR P S, BOESCH H E. Field- and time- dependent radiation effects at the SiO_2/Si interface of hardened MOS capacitor[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1977, 24:2 113-2 118.

[7] HABING D H, SHAFER B D. Room temperature annealing of ionization-induced damage in CMOS circuits[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1973, 20:307-314.