

NMOS 器件不同剂量率 γ 射线辐射响应的理论预估

何宝平 王桂珍 周 辉 龚建成 罗尹虹 姜景和

(西北核技术研究所, 西安市 69 信箱六室 710613)

(2002 年 4 月 11 日收到; 2002 年 5 月 12 日收到修改稿)

介绍了利用线性响应理论预估 CC4007-NMOS 器件在剂量率 0.1, 2.3, 44 和 91 rad(Si)/s 下的辐射损伤情况, 理论预估和试验结果符合得比较好. 利用线性响应理论预估了 CC4007-NMOS 器件从低剂量率到高剂量率环境下的辐射损伤及 25℃ 长时间退火情况, 结果表明, 在相同偏压下, 高剂量率辐照加室温退火所引起的阈值电压漂移量在误差容许的范围内等于低剂量率辐照的漂移量, 两者总的时间相同. 利用线性响应理论预估 CC4007-NMOS 器件在不同剂量率辐照下的失效剂量.

关键词: 辐射响应, 退火, 剂量率, 失效剂量

PACC: 6180E, 6170A

1. 引言

MOS 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 2—2500 rad(Si)/s, 许多研究表明^[1-3], MOS 器件和电路的辐照效应受到辐照剂量、剂量率、偏置、温度以及工艺条件的影响. 那么, 利用给定剂量率范围内一特定的剂量率进行效应模拟实验, 能否得到器件在较低剂量率环境和较高剂量率环境下响应的有用信息, 为了回答这个问题, 必须考虑器件的退火效应, 针对室温退火, 目前已发展了较成熟的线性响应理论, 这一理论使我们在合理的较短的时间内做实验, 然后将结果外推到长时间条件, 如空间的几年. 本文首先通过实验结果验证了线性响应理论的准确性和可行性, 然后利用线性响应理论对器件在低剂量率和高剂量率条件下的辐射和退火响应进行了理论预估, 最后利用线性响应理论对器件在不同剂量率条件下的失效剂量进行了预估.

2. 样品和辐射实验

样品及测量, 实验中所用的样品是由骊山微电子公司生产的加固型 CC4007—双互补对 CMOS 倒相器, 硅衬底材料为 N(100)晶向, 电阻率为 1—2 $\Omega \cdot \text{cm}$.

cm. 制备工艺采用 3 μm 硅栅工艺, 栅氧化层制备工艺为干氧化, 氧化温度为 1000℃, 栅氧化层厚度为 $t_{\text{ox}}=70\text{nm}$, 沟道宽长比 $W/L=25$.

电离辐射实验在西北核技术研究所⁶⁰Co γ 射线源上进行, 选取的 γ 射线剂量率有: 0.1 rad(Si)/s, 2.3 rad(Si)/s, 44 rad(Si)/s, 91 rad(Si)/s 四种, 为了考察辐照后器件的退火效应, 将器件在 44 rad(Si)/s γ 剂量率下辐照到 1×10^5 rad(Si) 总剂量, 然后将器件置于 25℃ 的恒温箱内退火 175h. 实验中所有的 γ 射线剂量率是利用 $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ 热释光剂量片进行标定的.

辐射和退火偏置: $V_{\text{GS}}=V_{\text{DD}}=+5\text{V}$, $V_{\text{SS}}=0\text{V}$.

辐照前后及退火过程中曲线测量和参数提取是通过由计算机、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的, 并保证每次测量在 0.5h 内全部完成.

3. 线性响应理论

如果器件的响应(阈值电压漂移)是随着剂量线性变化, 那么, 能够利用线性响应理论来预估器件在感兴趣的辐射环境下随时间的变化关系. 利用这个理论要求获得瞬时退火响应函数, 这个函数对于所有感兴趣的时间都是适用的.

许多作者研究表明^[4-7], MOS 器件的长时间退

火特性满足如下的方程:

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

式中 $\Delta V_0(t)$ 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 $\Delta V_{th}(t)$,

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

将(1)式代入方程(2), 并且假设剂量率为常量 $B \text{ (rad(Si) / s)}$, 在 $X \leq 1$ 情况下

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

在 $X > 1$ 的情况下

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

这里 $X = t/t_E$, t_E 是在剂量率 $B \text{ (rad(Si) / s)}$ 情况下总的辐照时间.

图1详细说明了如何确定线性响应理论中的常数 A 和 C , 利用 CC4007—NMOS 器件在 44 rad(Si) / s 剂量率辐照 $1 \times 10^5 \text{ rad(Si)}$ 总剂量, 然后常温退火 175h 的实验结果, 得常数

$$A = \frac{\Delta V_{th}(t_2) - \Delta V_{th}(t_1)}{\ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)} = 0.12,$$
$$C = 0.877.$$

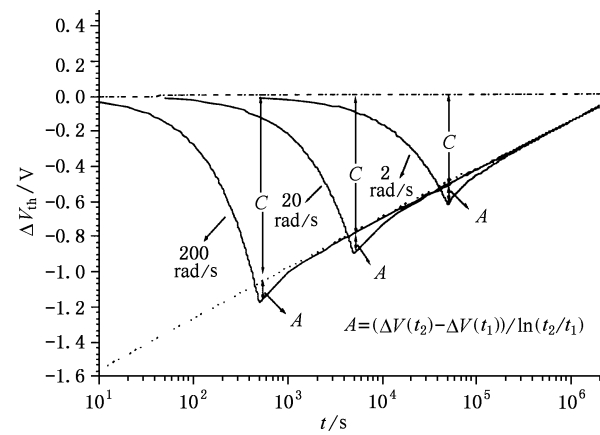


图1 线性响应理论中, 常数 A 和 C 的确定

4. 实验结果及理论预估

图2给出 CC4007—NMOS 器件在辐照剂量率分别为 0.1 rad(Si) / s , 2.3 rad(Si) / s , 44 rad(Si) / s 和 91 rad(Si) / s 情况下, 阈值电压漂移随辐照剂量的关系曲线, 图中的分散点表示实验数据, 光滑线表示利用线性响应理论预估的计算值. 从图中可以看出, 理论模拟值和实验值在较高剂量率辐照下符合得较好, 虽然在低剂量率辐照下理论模拟值和实验值有些差别, 但并不大, 这可能是由于剂量的不确定度所引起的. 图2证明了利用线性响应理论对 CC4007—NMOS 器件进行不同剂量率辐射损伤预估的可行性.

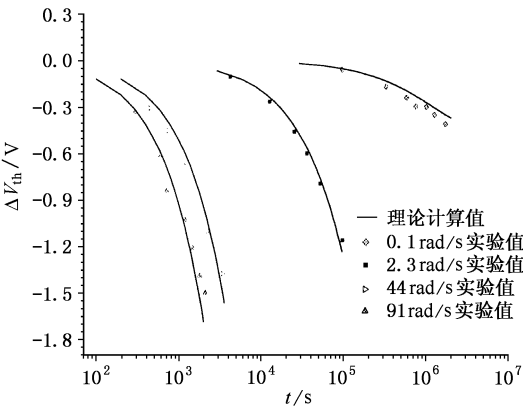


图2 四种剂量率辐照下, CC4007—NMOS 器件阈值电压随时间变化的辐射响应和理论预估

5. 不同剂量率 γ 射线的辐射响应预估

我们利用线性响应理论对 CC4007—NMOS 器件在高剂量率和低剂量率辐射环境下, 进行理论预估. 假设有两种情况: 1) 器件从低剂量率到高剂量率下辐照到 $1 \times 10^5 \text{ rad(Si)}$ 总剂量, 然后在 25°C 长时间退火; 2) 器件从低剂量率到高剂量率下辐照到 $1 \times 10^6 \text{ rad(Si)}$ 总剂量, 不进行退火. 利用线性响应理论模拟结果如图3, 图4所示.

图3给出了 CC4007—NMOS 器件在 0.02 rad(Si) / s , 2 rad(Si) / s , 20 rad(Si) / s 和 200 rad(Si) / s 四种剂量率辐照下, 辐照剂量为 $1 \times 10^5 \text{ rad(Si)}$, 退火温度为 25°C 的情况下, 阈值电压随时间的变换曲线, 从图中可以看出, 辐照后的曲线, 随着退火时间的增加, 阈值电压反方向发生漂移, 说明在 25°C 的退火情况下, 辐照感生的氧化物陷阱发生退火, 而界面态在增

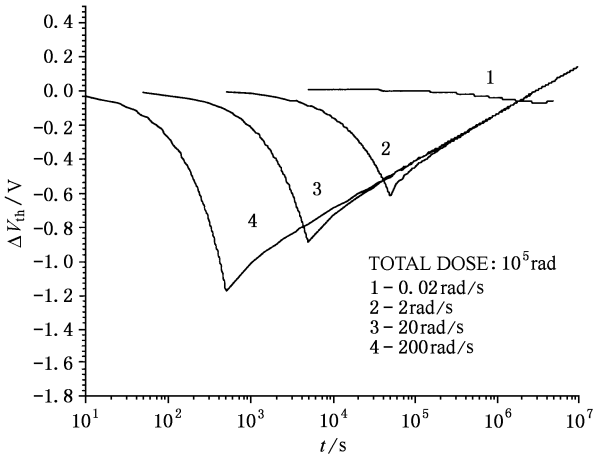


图3 不同剂量率辐照下, 阈值电压随时间的变化关系(辐照剂量为 $1 \times 10^5 \text{ rad(Si)}$, 25°C 长时间退火)

加. 而且不管在何种剂量辐照下, 退火斜率是相同的. 高剂量率辐照加室温退火所引起的阈值电压漂移量在误差容许的范围内等于低剂量率辐照的漂移量, 两者总的时间相同.

图4 给出了利用线性响应理论从低剂量率到高剂量率预估器件辐照到 $1 \times 10^6 \text{ rad(Si)}$ 总剂量情况下, 阈值电压随辐照时间的变化关系. 从图4中可以

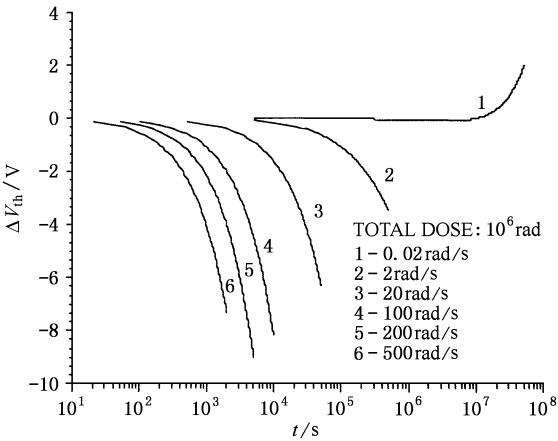


图4 不同剂量率辐照下, 阈值电压随时间的变化关系(辐照剂量为 $1 \times 10^6 \text{ rad(Si)}$)

看出, 器件低剂量率和高剂量率环境下的失效机理是不同的, 在低剂量率下, 器件失效的原因是界面

态, 而在高剂量率下, 器件失效的原因是氧化物陷阱电荷.

6. 器件失效剂量的预估

利用线性响应理论还可以对 MOS 器件的失效剂量进行预估. 一般来讲, NMOS 器件受辐照后, 阈值电压会发生漂移, 漂移到一定程度, 会导致器件失效, 这时的辐射剂量称作器件的失效剂量, 受不同剂量率辐照, 器件的失效剂量是不同的. 在文章中, 按照美军标规定, NMOS 器件阈值电压的漂移 $|\Delta V_{th}| = 1.4$ 时, 认为器件发生失效.

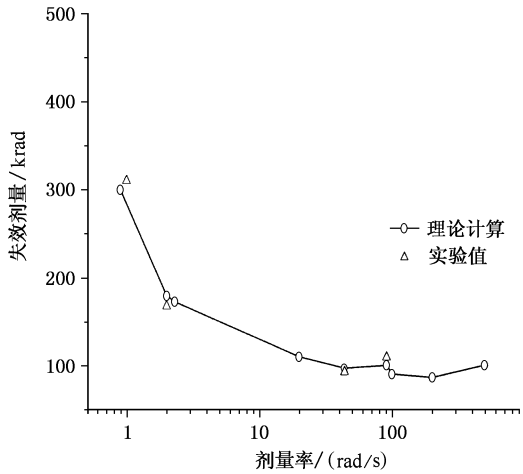


图5 CC4007-NMOS 器件失效剂量随辐射剂量率的关系

图5 给出了 CC4007-NMOS 器件失效剂量随辐射剂量率的变化关系. 从图中可以看出, 响应理论计算结果与实验符合得较好.

7. 结 论

利用线性响应理论能够预估 CC4007—NMOS 器件从低剂量率到高剂量率的辐射响应, 理论预估和试验结果符合得比较好, 而且在相同偏压下, 高剂量率辐照加室温退火所引起的阈值电压漂移量在误差容许的范围内等于低剂量率辐照的漂移量, 两者总的时间相等.

[1]

Zhang T Q, Liu J L, Li J J *et al* 1999 *Acta phys. Sin.* **48** 2299 (in Chinese) (张廷庆、刘家璐、李建军等 1999 物理学报 **48** 2299)

[2]

Fan L, Ren D Y, Zhang G Q *et al* 2000 *Chin. J. Semicond.* **21** 383(in Chinese) [范 隆、任迪远、张国强等 2000 半导体学报 **21** 383]

[3]

Wang J P, Xu N J, Zhang T Q *et al.* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1334(in Chinese) [王剑屏、徐娜军、张廷庆等 2000 物理学报 **49** 1334]

[4]

Debrinkenwick G F and Sander H H 1977 *IEEE Trans Nucl. Sci.* **24** 2244

[5]

Winokur P S and Boesch H E 1981 *IEEE Trans Nucl. Sci.* **27** 1647

[6]

Habing D H and Shafer B D 1977 *IEEE Trans Nucl. Sci.* **20** 2113

[7]

Brucker G J and Shafer B D 1973 *IEEE Trans Nucl. Sci.* **20** 307

Predicting NMOS device radiation response at different dose rates in γ -ray environment

He Bao-Ping Wang Gui-Zhen Zhou Hui Gong Jian-Cheng Luo Yin-Hong Jiang Jing-He
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 69mail box No. 6 Laboratory, Xi'an 710613, China)
(Received 11 April 2002; revised manuscript received 12 May 2002)

Abstract

Linear response theory was used to predict threshold-voltage shifts for CC4007-NMOS device at dose rates of 0.1, 2.3, 44 and 91rad(Si)/s. These predictions were compared with the threshold-voltage shifts obtained after ^{60}Co irradiations actually performed at these dose rates, and the agreement is excellent. Also, we use the linear response theory to predict the response of CC4007—NMOS device during radiation and 25 $^{\circ}\text{C}$ annealling for high and low-dose-rates. According to the predictions, under the same conditions of radiation and annealling, the threshold-voltage shifts caused by high dose-rate irradiation after room temperature annealling were equal to that by low-dose-rate irradiation within the limit of error, but the total times for both were the same. Finally, the failure doses for CC4007—NMOS device at different dose rates of irradiation were predicted also using the linear response theory.

Keywords: irradiation response, anneal, dose rate, failure dose
PACC: 6180E, 6170A