

空间低剂量率辐射感生漏电流预估方法研究

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

1 (中国科学技术大学 合肥 230026)

2 (西北核技术研究所 西安 710024)

摘要 本文给出了一种预估 CMOS 器件辐照感生漏电流的总剂量辐射响应模型, 并利用模型计算了非加固 C4007B 和加固 CC4007RH NMOS 器件受不同 γ 射线剂量率辐射下的总剂量效应。研究表明, 在实验室选用任意一特定剂量率进行辐射实验和室温退火, 利用给定的模型可以预估其它剂量率辐射下的总剂量效应, 并给出了 CC4007RH 和 C4007B 器件空间低剂量率 ($1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-2} \text{ rad/s}$) 环境下的漏电流的预估结果。

关键词 漏电流, 低剂量率效应, 预估方法, 总剂量

中图分类号 TN386.1

应用于空间辐射环境中的 CMOS 器件由于受到带电粒子的作用, 会发生电离辐射总剂量损伤现象, 如漏电流增加等。因此应用于空间环境中的 CMOS 器件必须在地面通过严格的考核。国内外研究者在地面考核试验中一般采用 ^{60}Co γ 射线源, 并进行了大量的试验研究^[1-4]。任何总剂量加固保证程序设计的目的是根据实验室 ^{60}Co γ 射线较高剂量率 ($2 - 100 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$) 试验结果来预估 CMOS 器件在空间低剂量率 ($1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-2} \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$) 环境中的效应。利用这种试验程序进行考核存在的问题是: (1) 实验室考核的剂量率与实际空间环境剂量率不同; (2) CMOS 器件辐射后效应依赖辐射剂量率、偏压、退火时间和温度等。因此, 人们必然要提出以下问题: 在实验室利用给定的较高剂量率范围内一特定的剂量率进行效应模拟试验, 能否得到器件在较低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。本文利用建立的模型来预估 CMOS 器件处于空间低剂量率环境下辐射感生漏电流的大小。

1 漏电流模型的建立

一般情况下 MOSFET 产生漏电流可能有三种途径: 第一种是由于阈值电压漂移所产生的亚阈漏电流; 第二种是发生在边缘栅区的漏电流; 第三种是场氧漏电流。真正的漏电流是上述三种漏电流之和。但是, 在实际中起主要作用的是第二、三种漏电流, 它们是由寄生的 MOSFET 所引起的。第一种漏电流只有在阈值电压漂移随吸收剂量的增加发生

异常增加时, 才起主要作用。因此, 漏电流模型中, 只考虑后两种漏电流。研究资料表明, 辐射诱导感生漏电流的脉冲响应满足如下的指数形式^[5]:

$$I_0(t) = K_1 \exp(-\lambda_1 t) + K_2 \exp(-\lambda_2 t) \quad (1)$$

其中, K_1 和 K_2 分别是边缘栅区和场氧区每单位吸收剂量所产生的漏电流; λ_1 和 λ_2 是漏电流退火时间常数, 下标 1、2 代表产生漏电流的不同部位。通过对公式 (1) 进行积分, 可以得到任何时刻漏电流的响应变化:

$$I(t) = \int_0^t \gamma(\tau) I_0(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

假设剂量率是常数, 可以得出:

$t \leq t_0$ 时,

$$I(t) = \sum_{i=1}^2 \frac{K_i B}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (3)$$

$t > t_0$ 时,

$$I(t) = \sum_{i=1}^2 \frac{K_i B}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t_E}) e^{-\lambda_i (t - t_E)} \quad (4)$$

式中, t_E 是在剂量率 B 辐射下的照射时间。

2 外推其它剂量率辐射响应的实验过程

下面给出一个试验程序来预估辐射诱导 CMOS 器件参数漏电流的变化。该试验程序主要根据以下三步来执行:

第一步: 根据辐射后产生的漏电流选择简单的方程;

第二步: 根据试验数据确定方程参数;

第三步:运用确定下来的方程去外推感兴趣(时间、剂量率、温度)的结果(见流程图 1)。

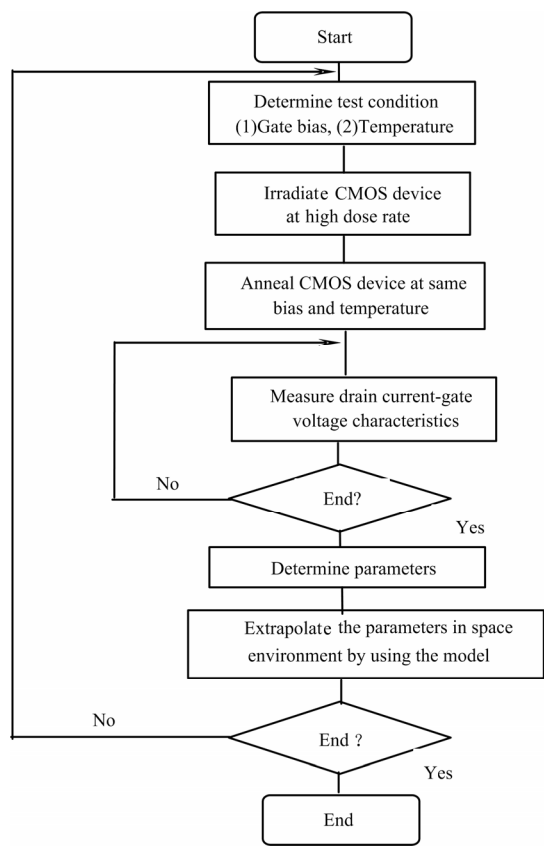


图 1 预估空间低剂量率效应流程图
Fig.1 Flow chart of experimental procedure for predicting low dose rate effect in space environment

表 1 CMOS 电路在不同剂量辐照下的退火条件
Table 1 Annealing conditions of CMOS devices for irradiation with different dose rate

器件类型	γ 剂量率	总剂量	退火温度	退火时间
Device type	γ -rays dose rate / $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	Total dose / rad	Annealing temperature / $^{\circ}\text{C}$	Annealing time / h
Hardened CC4007RH	44	1×10^5	25	175
Unhardened C4007B	52.7	6324	25	168

管的工作点将不同。当本征管还处在亚阈值时,寄生管工作点已在阈值以上的饱和区或线性区,电流主要从场区边缘流过。因此,辐射引起的场区边缘寄生漏电严重劣化了 NMOSFET 器件的阈值区特性。

图 2 给出了 CMOS 器件在 $0.1\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $44\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 剂量率辐照下,辐照剂量为 $1\times 10^5\text{ rad}$ 时, N 沟器件辐照前后 $I-V$ 曲线的变化。辐射后数据显示,漏电流有大量的增加。图 3 给出了漏电流的确定方法。辐照后实际测量的 $I-V$ 曲线是由本征 MOSFET 器件和寄生 MOSFET 器件两部分组成,我们真正关心的本征 MOSFET 器件 $I-V$ 曲线,可以由实际测量

3 辐射试验及参数的测量

辐射试验在西北核技术研究所的 ^{60}Co γ 射线源上进行。试验样品有两种:加固 CC4007RH 和非加固 C4007B CMOS 器件。

加固型 CC4007RH CMOS 倒相器,选择的 γ 射线辐射剂量率为 $0.1、1.0、2.3、31、44$ 和 $91\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 6 种;市售非加固 C4007B CMOS 电路,选择的 γ 射线辐射剂量率为 $0.06、0.2$ 和 $52.7\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 3 种。辐射和退火偏置条件为: $V_{\text{GS}}=V_{\text{DD}}=+5\text{ V}$, $V_{\text{SS}}=0\text{ V}$ 。退火试验条件列于表 1。

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、半导体精密参数分析仪、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,并保证每次测量在半小时内全部完成。

4 漏电流的提取过程

人们在研究 MOS 器件辐射响应物理机制时,注意点集中在栅极氧化层和氧化层俘获电荷积累的影响。然而,相同的物理过程也会发生在较厚的场区氧化层中,并且还产生不希望有的漏电沟道。我们可以把场区边缘看成一个与本征 NMOSFET (栅氧化层区) 并联的辐射寄生 NMOSFET 管。实际上源漏电流是由本征管和寄生管两部分组成,一定剂量辐照后,由于场氧化层比栅氧化层厚得多,生成电荷体积相当大,于是同一栅压下,寄生管和本征

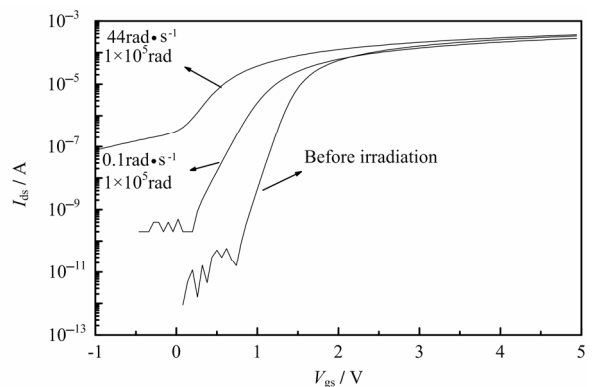


图 2 CC4007RH 器件 $I-V$ 曲线
Fig.2 $I-V$ characteristics of CC4007RH

到的 $I-V$ 曲线减去寄生 MOSFET 部分而得到。栅偏压为 0 V 时的电流(称漏电流)是通过寄生 MOSFET 器件 $I-V$ 曲线确定的。

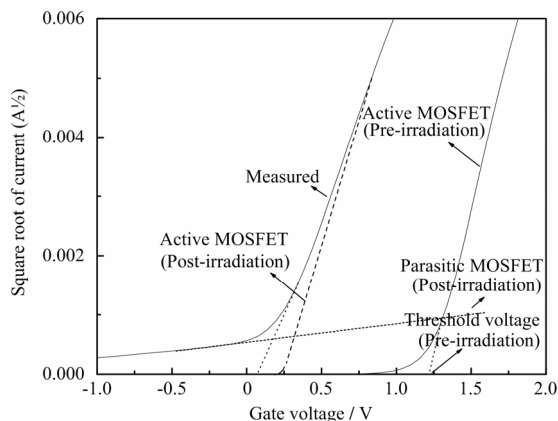


图 3 阈值电压和漏电流的确定
Fig.3 Determination of threshold voltage and leakage current

5 试验结果与讨论

5.1 漏电流模型参数的确定

加固器件 CC4007RH 的漏电流模型参数 (K_1 、

λ_1 、 K_2 、 λ_2) 是按照 $44 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 辐照后 25°C 退火数据确定的; 非加固器件 C4007B 器件漏电流模型参数 (K_1 、 λ_1 、 K_2 、 λ_2) 是按照 $52.7 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 辐照后 25°C 退火数据确定的, 确定方法如图 4 所示。不同 CMOS 器件确定的模型参数如表 2 所示。

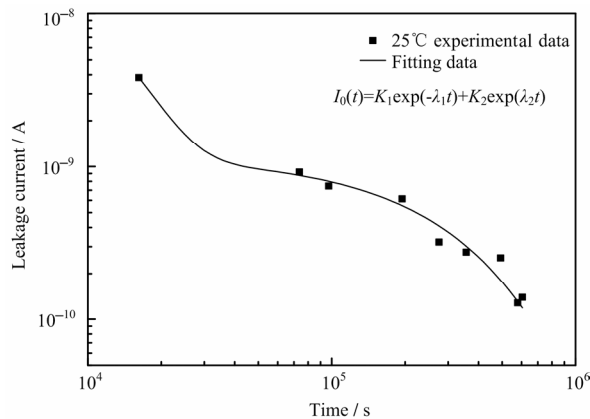


图 4 漏电流随退火时间的变化
Fig.4 Leakage current vs. annealing time

表 2 不同 CMOS 器件的漏电流模型参数
Table 2 Model parameters of leakage current for different CMOS devices

Device type	$K_1 / \text{A}\cdot\text{rad}^{-1}$	$\lambda_1 / \text{s}^{-1}$	$K_2 / \text{A}\cdot\text{rad}^{-1}$	$\lambda_2 / \text{s}^{-1}$
Hardened CC4007RH	4.78×10^{-13}	1.76×10^{-4}	1.15×10^{-14}	3.76×10^{-6}
Unhardened C4007B	1.04×10^{-11}	2.11×10^{-5}	4.09×10^{-11}	5.99×10^{-4}

5.2 不同剂量率辐照下感生漏电流的预估

根据表 2 的模型参数, 利用公式 (3) 计算了 CC4007RH 器件漏电流随辐射剂量率和总剂量的关系, 如图 5 所示。从图 5 看出, 理论计算数据与试验数据符合得较好, 辐照感生漏电流随吸收总剂量的增加而增加, 且在相同总剂量辐照下, 剂量率越高, 辐射感生的漏电流越大。这主要是因为辐照剂量率越高, 辐照感生的氧化物陷阱电荷越多。因此, 在模拟空间辐射效应时, 如果仅仅采用高剂量率进行辐照, 必然会得出错误的评判。因此, 在实验室利用高剂量率 γ 射线来模拟空间低剂量率效应, 必须采用退火的办法来降低辐照感生的氧化物陷阱电荷^[5]。

我们利用漏电流模型公式 (4) 计算了加固 CC4007RH 和非加固 C4007B 器件在不同剂量率辐照和在 25°C 室温环境下, 漏电流随辐照和退火时间的变化, 如图 6(a)、(b)所示。从图 6 可以看出, 无论是何种器件, 漏电流随着辐照时间的增加而增加。

辐照剂量率越大, 漏电流增加得越快, 但随着退火时间的增加而减小。从图 6 可以得出, 在辐照总剂量相同的情况下, 不同剂量率辐照引起的漏电流在室温下长时间退火的结果是相同的。

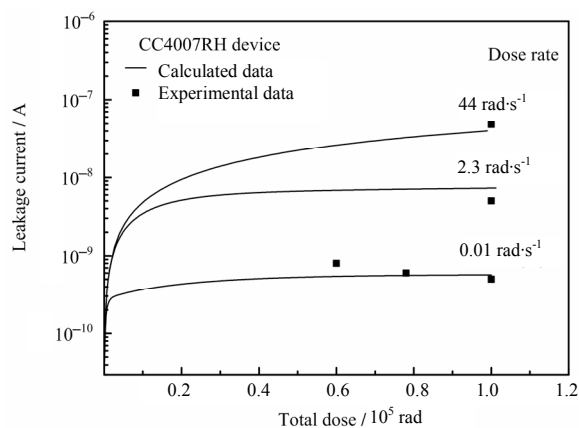


图 5 加固 CC4007RH 漏电流随辐射总剂量的变化
Fig.5 Leakage current vs. irradiation total dose for hardened CC4007RH device

5.3 空间低剂量率辐射下漏电流的预估

利用漏电流模型公式 (3) 预估了加固 CC4007RH 和非加固 C4007B CMOS 器件在空间极低剂量率环境下, 漏电流随飞行时间的变化 (图 7(a)、(b)所示)。从图 7 看出, 在空间极低剂量率 ($1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-2} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$) 环境下, 辐射总剂量为

$1 \times 10^5 \text{ rad}$ 时, 加固器件 CC4007RH 辐射感生漏电流的范围为 $4.49 \times 10^{-14} - 5.7 \times 10^{-11} \text{ A}$; 辐射总剂量为 6324 rad 情况下, 非加固器件 C4007B 辐射感生漏电流范围为 $4.1 \times 10^{-12} - 5.6 \times 10^{-9} \text{ A}$ 。在相同剂量率辐射下, 加固器件 CC4007RH 辐射感生的漏电流小于非加固器件 C4007B 两个量级。

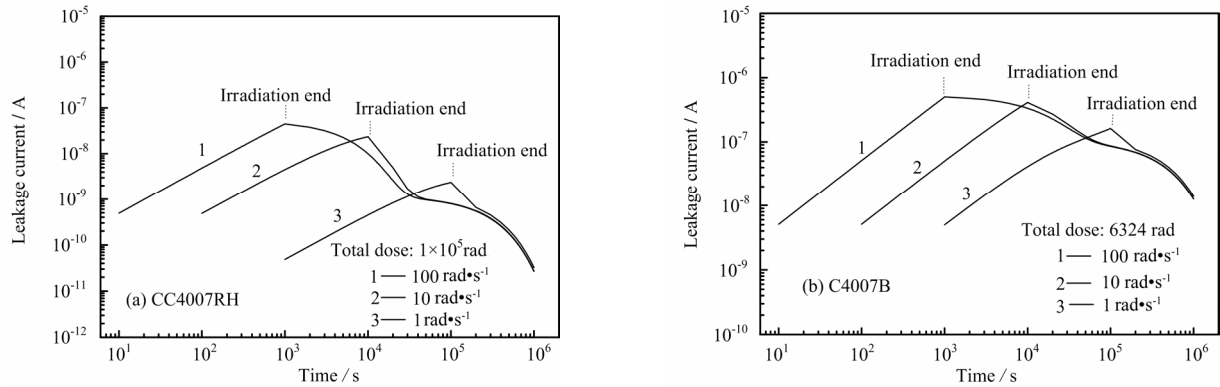


图 6 漏电流随辐照和退火时间的变化
Fig.6 Leakage current vs. irradiation time and annealing time

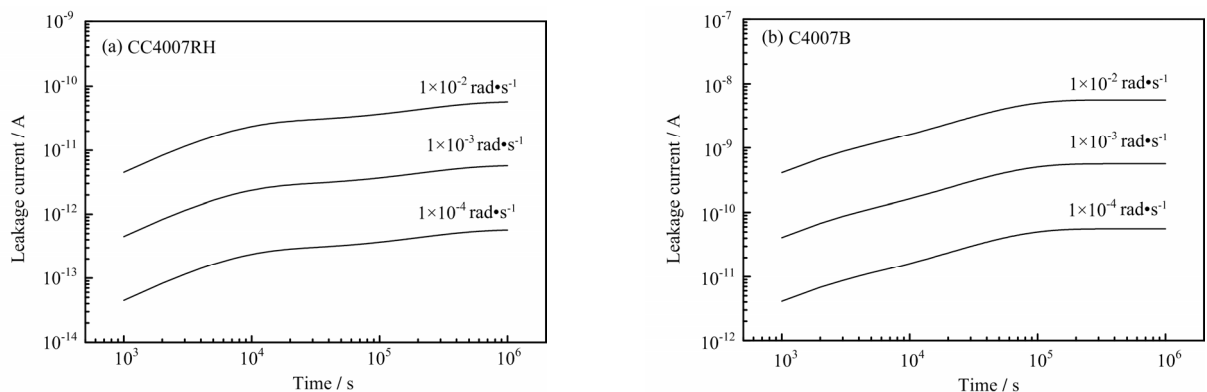


图 7 预估空间低剂量率环境下漏电流随照射时间的变化
Fig.7 Leakage current vs. irradiation time at low dose rate of space environment

6 结论

文章给出了一种漏电流线性响应模型, 并利用建立的模型进行了不同 γ 射线剂量率辐射下器件总剂量效应理论预估, 理论模拟结果和实际试验结果符合得较好。在试验室选用任意一特定剂量率进行总剂量辐射和室温退火, 通过建立的模型可以预估器件空间低剂量率辐射下的漏电流。在空间极低剂量率 ($1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-2} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$) 环境下, 辐射总剂量为 $1 \times 10^5 \text{ rad}$ 情况下, 加固器件 CC4007RH 辐射感生漏电流的范围为 $4.49 \times 10^{-14} - 5.7 \times 10^{-11} \text{ A}$; 辐射总剂量为 6324 rad 情况下, 非加固器件 C4007B 辐射感生漏电流范围为 $4.1 \times 10^{-12} - 5.6 \times 10^{-9} \text{ A}$ 。在相同剂

量率辐照下, 加固器件 CC4007RH 辐射感生的漏电流小于非加固器件 C4007B 两个量级。

参考文献

- 1 Vitaly D, Desai U D. J Appl Phys, 1968, **39**(5): 2417—2427
- 2 Simons M, Hughes H L. IEEE Tran Nucl Sci, 1972, **19**(6): 282—290
- 3 姚育娟, 张正选, 姜景和, 等. 半导体学报, 2000, **21**(4): 378—382
YAO Yujuan, ZHANG Zhengxuan, JIANG Jinghe, et al. Chin J Semicond, 2000, **21**(4): 378—382
- 4 何宝平, 王桂珍, 周辉, 等. 物理学报, 2003, **52**(1): 188

—191

HE Baoping, WANG Guizhen, ZHOU Hui, *et al.* Acta
Phys Sin, 2003, **52**(1): 188—191

5 Kamimura H, Sakagami M, Uchida S, *et al.* Proceedings
of anneal reliability and maintainability symposium, 1992,
202—209

Research of prediction method of radiation induced leakage current at low dose rate irradiation in space environment

HE Baoping^{1,2} ZHOU Heqin¹ LUO Yinhong² ZHOU Hui² GUO Hongxia² YAO Zhibin²
ZHANG Fengqi²

1 (University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

2 (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024)

Abstract A radiation response model of total dose effect for CMOS devices in a space environment is presented to predict the radiation-induced leakage current. Total effects for CC4007RH and C4007B devices at different dose rates irradiation of γ rays were calculated by using the established model. So long as total dose irradiation test and post-irradiation annealing test at room temperature were carried out by choosing one dose rate at random, total dose irradiation effects at other dose rates can be predicted by using the established models. Finally, the prediction results of 10^{-4} — 10^{-2} rad·s⁻¹ low dose rate irradiation for CC4007RH and C4007B devices in space environment were presented.

Key words Leakage current, Low dose rate effect, Prediction method, Total dose

CLC TN386.1