

MOS 器件的质子总剂量效应

王桂珍 张正选 姜景和 罗尹红 彭宏论 何宝平

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 介绍了几种加固和非加固 MOS 电路的质子辐照总剂量效应实验, 质子束的能量为 9、7、5、2MeV. 实验结果表明, 在相同的吸收剂量下, MOS 器件累积电离辐射损伤与质子能量成正比. 还给出了栅极偏压对器件质子辐射损伤的影响, 结果认为, 对于 NMOSFET, 不论是加固器件, 还是非加固器件, 在 +5V 的栅压偏置下, 器件的辐射损伤比 0V 栅压下的损伤严重, 对于加固器件, 辐射感生界面态的密度也较高; 而加固型 PMOSFET, 在 0V 的栅压下, 辐射损伤比 -5V 下严重, 且界面态的密度高.

关键词: 总剂量效应; 质子; Faraday 筒; 阈值电压; 漏电流

PACC: 5190; 1420

EEACC: 2560

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)11-1468-06

1 前言

多年来, 对半导体器件及电路的总剂量效应研究主要依赖于⁶⁰Co 源产生的 γ 射线来模拟空间辐射环境. 而空间辐射环境比较复杂, 主要包括高能质子、电子等, 所以在评估空间辐射环境下的使用寿命时, 需要研究质子与实验室⁶⁰Co- γ 源之间总剂量效应的等效性. 本文主要研究能量在 10MeV 以下的质子对几种典型电子元器件的总剂量效应, 为进行不同源的总剂量效应的等效性研究打下一定的基础.

美国曾分别进行过加固器件与非加固器件的质子辐射损伤研究^[1,2], 得到的结果有不尽相同之处, 本文对加固型器件和非加固型器件同时进行质子辐照, 以考察两种器件的质子辐射效应的异同性.

2 质子与物质相互作用及其总剂量效应的机理

质子在穿过靶物质时, 与靶原子的核外电子发生作用, 使靶原子电离, 产生电子空穴对. 电离过程中放出的高能电子(δ 电子) 具有足够的能量, 可继

续引起其它原子发生电离, 由于质子的质量大, 在与物质作用损失能量的过程中, 运动方向变化不大, 它的轨迹几乎是直线^[3].

质子与器件灵敏层相互作用, 在灵敏层沉积能量, 产生电子空穴对, 电子空穴对在外加电场的作用下向相反的方向漂移, 由于电子的迁移率比较大, 且热氧化 SiO₂ 中电子陷阱较少, 电子可快速移至正电极. 而空穴的迁移较慢, 在漂移过程中, 部分空穴被空穴陷阱俘获, 形成陷阱电荷, 陷阱电荷使器件的电参数发生变化, 如阈值电压漂移、迁移率降低、漏电流增大等, 可影响到整个电路的性能, 降低系统的使用寿命.

本文主要从实验上对 MOS 器件的质子总剂量效应进行研究, 探讨质子总剂量效应模拟实验方法及技术, 为进一步研究不同源对器件的电离辐射效应的异同性, 及摸索正确的器件抗空间辐射环境的评估方法打下一定的基础.

3 实验方法

3.1 实验样品

选用的测试样品为: (1) 西安微电子公司生产的

王桂珍 女, 1967 年出生, 硕士生, 副研究员, 现从事辐射测量和器件辐射效应研究工作.

2000-10-28 收到, 2001-01-02 定稿

加固型 CC4007RH 电路, 衬底为 N(100) 硅, 电阻率为 $1-2\Omega \cdot \text{cm}$, 1000°C 干氧氧化, 氧化层厚度 70nm , 沟道长度 $3\mu\text{m}$; (2) 商用 CC4011 和 CC4069 CMOS 集成电路, CC4011 为四个与非门电路, CC4069 为六反向器; (3) 西安电子科技大学提供的加固 MOS 电路, 宽长比分别为 $W/L=15$, 衬底为 N(100) 硅, 电阻率为 $4-6\Omega \cdot \text{cm}$, 1000°C 干氧氧化, 900°C N_2 气退火 30min , 栅氧化层厚度为 48nm .

CC4007RH、CC4069 及 PMOS 电路辐照时加有两种不同的偏置电压, CC4007RH 和 CC4069 的辐照偏置为: (1) $V_{\text{GS}} = V_{\text{DS}} = +5\text{V}$; (2) $V_{\text{GS}} = 0\text{V}$, $V_{\text{DS}} = +5\text{V}$. PMOS 电路的辐照偏置为: (1) $V_{\text{GS}} = V_{\text{DS}} = -5\text{V}$; (2) $V_{\text{GS}} = 0\text{V}$, $V_{\text{DS}} = -5\text{V}$. NMOS 与 CC4011 电路的辐照偏置 $V_{\text{GS}} = V_{\text{DS}} = +5\text{V}$. 器件全部采用正面照射.

3.2 辐射源

辐照实验是在北京大学重离子物理研究所的 EN 串列加速器上进行, 质子能量 10MeV 以下, 选择了 2.5 、 7 、 9MeV 四个能量点对器件进行辐照. 在真空腔体内, 质子束流照射金箔, 将散射方向为 $3^\circ \pm 1^\circ$ 的束流引出靶室, 用光阑把束流限制在 $\Phi 5\text{mm}$ 内, 用两个金硅面垒探测器监测束流强度, 一个测量 3° 方向的质子束流, 一个置于 120° 方向上, 用于进行器件效应实验时监测质子束流.

在 3° 的出束方向上, 挡一厚为 $0.2\mu\text{m}$ 的钼, 把质子束引到空气中, 测量盘直径 11mm , 在紧贴钼靶的测量盘上放置照射器件, 使整个实验可方便地在空气中进行.

3.3 辐射环境的测量

辐照电路在质子束流 3° 方向上进行照射, 实验前用金硅面垒探测器和 Faraday 筒测量质子束流率, 用于计算器件的吸收剂量, 但北京大学 EN 串列加速器的质子束流率不是很稳定. 为了在辐照实验中实时监测束流的大小, 把一金硅面垒探测器放在真空腔体内, 在质子束流 120° 方向上, 对侧向质子进行监测, 以便理论计算 3° 方向的质子束流率. 实验前要首先标定两个方向的质子束流率之比, 并且每辐照完一个器件后, 用 Faraday 筒和热释光剂量片对质子束流进行测量, 用以对吸收剂量进行校正.

3.4 器件辐射敏感参数测量系统

采用由微机、半导体参数测试仪、矩阵开关、488

接口卡等组成的半导体参数自动测试系统进行器件敏感参数的测量. 器件 CC4011、CC4069 及 NMOS、PMOS 电路由于测试简单, 其敏感参数采取原位测量, 辐照一定时间, 由控制台挡住质子束流, 在测试大厅启动测试程序进行参数测量; CC4007RH 由于测试复杂, 采取移位测量.

图 1 给出了器件辐照及测试系统, 在辐照过程中, SBD 探测器(金硅面垒探测器)放在真空腔体内, 实时监测质子束流. 信号经多芯电缆传输至屏蔽测试间, 由半导体参数自动测试系统对器件辐射敏感参数进行测量.

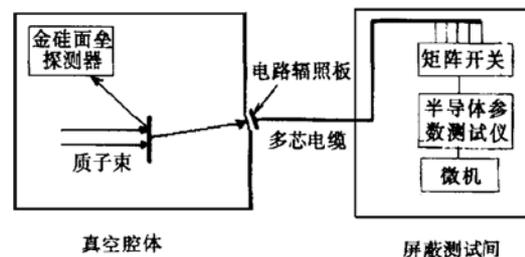


图 1 器件质子辐照与测试系统

FIG. 1 Proton Irradiation and Test Setup

4 实验结果及分析

4.1 质子能量对总剂量效应的影响

图 2 给出了加固型 CC4007RH 器件在 $+5\text{V}$ 辐照偏置条件下, 在能量为 7 、 5 、 2MeV 的质子辐照下, 阈值电压漂移与总剂量的关系, 图 2(a) 为 NMOS 管的阈值电压漂移情况; 图 2(b) 为 PMOS 管的阈值电压漂移情况. 从图中可以看出, CC4007RH 在 $+5\text{V}$ 的栅极偏压下, 器件的阈值电压漂移量随着质子能量的增加而增大, 说明质子对 CMOS 电路的电离辐射损伤随质子能量的增加而愈加严重. 比较器件的 N 管和 P 管的质子辐射效应, 在相同的总剂量辐照下, N 管的阈值电压漂移大于 P 管的阈值电压漂移, 说明在 $+5\text{V}$ 辐照偏置下, N 管的总剂量效应较 P 管的总剂量效应明显. 对于参试的加固型 NMOS, PMOS 及商用 CC4069、CC4011 器件也得到了与 CC4007RH 类似的关系.

4.2 栅极偏压的影响

4.2.1 非加固器件

图 3、4 为商用器件 CC4069, 辐照栅压为 $+5\text{V}$ 和 0V , 在不同总剂量辐照下测量的 $I_{\text{DS}}-V_{\text{GS}}$ 转移特

性曲线. 从图 4 可以看出, 在偏压为 0V 时, 由于照射时间长, 从图中已经可以看出 NMOS 管有明显的界面态产生, 曲线斜率发生了显著变化, 阈值电压已经回漂; 而在偏压为 + 5V 时 (图 3), 不仅有曲线斜率的变化, 且其漏电流显著增加. 在两种偏压情况

下, PMOS 管漏电流及界面态都没有显著的增大, 说明参试 CMOS 电路 CC4069 中的 PMOS 管在质子辐照下, + 5V 与 0V 偏压对其总剂量效应没有明显影响, 而 NMOS 管的总剂量效应极强地受到了偏压的影响.

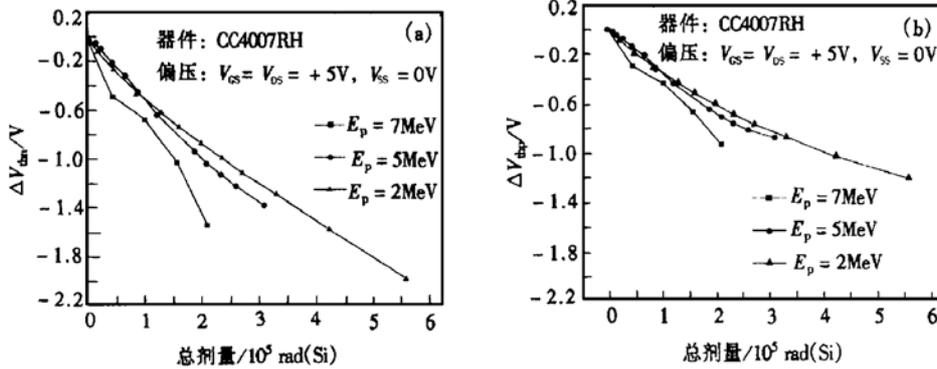


图 2 CC4007RH 中 MOS 管阈值电压漂移与质子能量及总剂量的关系 (a) NMOS 管; (b) PMOS 管

FIG. 2 Threshold Voltage Shifts for Hard Oxide Device CC4007 ($V_{GS} = + 5V$ during irradiation) as Function of Radiation Dose, with Proton Energy as Parameter

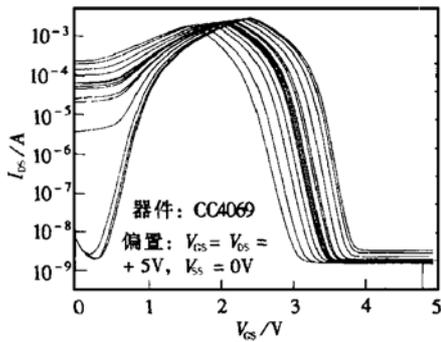


图 3 器件 CC4069 栅压为 + 5V 时 I_{DS} - V_{GS} 曲线随总剂量的变化

FIG. 3 I_{DS} Versus V_{GS} for Soft Oxide Device CC4069 ($V_{GS} = + 5V$ when irradiated)

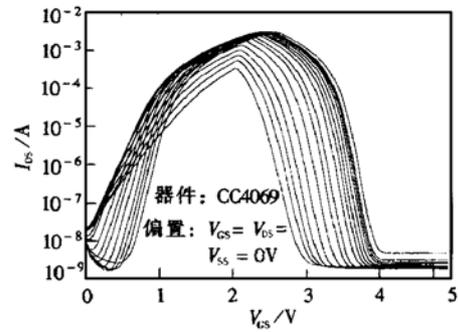


图 4 器件 CC4069 栅压为 0V 时 I_{DS} - V_{GS} 曲线随总剂量的变化

FIG. 4 I_{DS} Versus V_{GS} for Soft Oxide Device CC4069 ($V_{GS} = 0V$ when irradiated)

图 5 给出了 CC4069 器件在两种偏压下 NMOS 管和 PMOS 管阈值电压漂移量与总剂量的关系, 这几条曲线是从图 3、4 的转移曲线中提取其阈值电压而得到的. 从图中可以看出, 对于实验中所用的 CC4069 电路, 其 P 管在 + 5V 和 0V 的偏压辐照条件下, 阈值电压的漂移差别不大, 而对于 N 管来说, 却表现了不同的行为, 在 $8 \times 10^4 \text{ rad(Si)}$ 的总剂量时, 阈值电压已经出现反弹.

4. 2. 2 加固型器件

图 6 给出了加固型 PMOS 单管在不同栅压下的总剂量效应的比较. 器件在 - 5V 及 0V 偏压下, 阈值电压的漂移行为有很大的不同, 从图中可以看出, PMOS 在 - 5V 偏压下, 可以承受的总剂量比在 0V 偏压下要高得多. 对于界面态的产生, 虽然 PMOS 器件在 - 5V 偏压辐照下, 耐受的总剂量高, 受照时间长, 但其界面态的密度却远不如受照时间短的辐照偏压为 0V 的高.

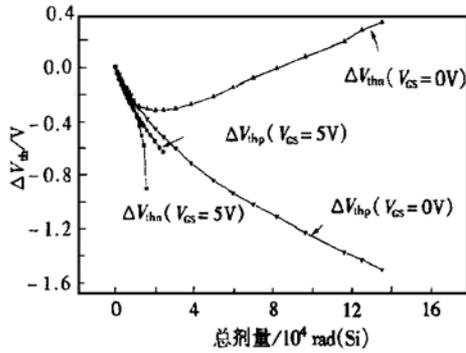


图5 商用CC4069在栅压为+ 5V, 0V 时阈值电压漂移与总剂量的关系

FIG. 5 Threshold Voltage Shifts for Soft Oxide Device CC4069 as Function of Total Radiation Dose, with Bias as Parameter

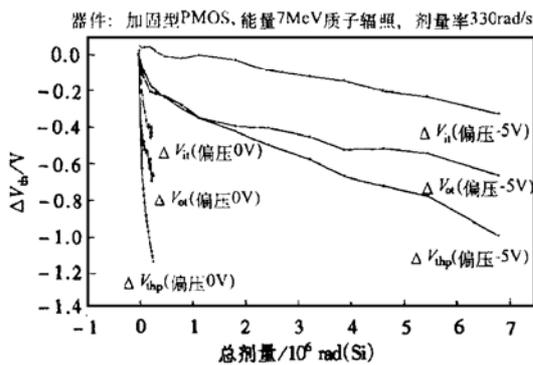


图6 PMOS 器件在栅压为- 5V, 0V 时阈值电压漂移与总剂量的关系 ΔVth: 阈值电压漂移量; ΔVthi、ΔVtho: 由界面陷阱电荷、氧化物陷阱电荷引起的阈值电压漂移

FIG. 6 Threshold Voltage Shifts for Hard Oxide PMOS Device as Function of Total Dose with Bias as Parameter ΔVth: Net Threshold Voltage Shift; ΔVthi、ΔVtho: Threshold Voltage Shifts due to Interface-Trap Charge and Oxide-Trap Charge

图7为CC4007RH 器件在5MeV 质子辐照下, 阈值电压漂移与总剂量、辐照偏压的关系. 可以看出, 与PMOS 的结果相似, CC4007RH 在+ 5V 偏置条件下, 不论NMOS 管, 还是PMOS 管, 虽然其辐照时间短, 但界面态的密度远高于0V 偏置情况. 图7(c)为CC4007RH 的N 管在受质子辐照初期, 在不同偏置条件下阈值电压的漂移, 从图中可以看出, 在辐照初期, 界面态密度与偏压没有直接关系, 说明界面态的产生需要一定的时间或辐照剂量.

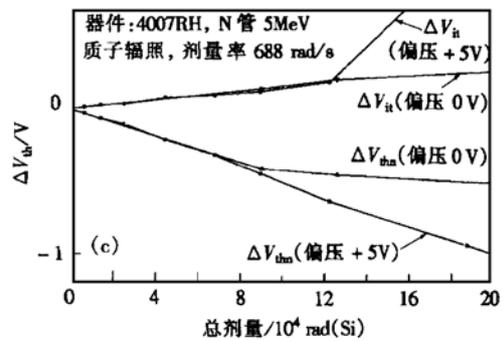
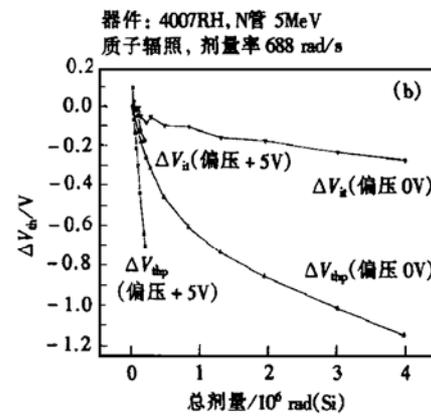
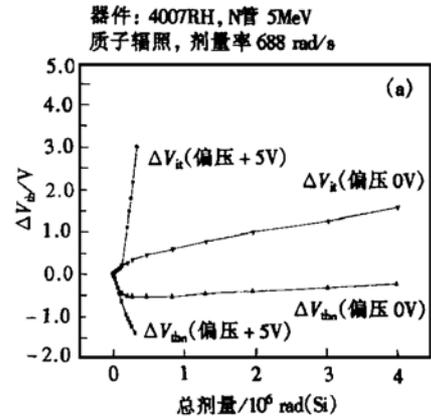


图7 CC4007RH 器件在5MeV 质子辐照下, 阈值电压漂移与总剂量、辐照偏压的关系 (a) NMOS 管; (b) PMOS 管; (c) N 管(辐照初期) ΔVthn: N 管阈值电压漂移量; ΔVthp: P 管阈值电压漂移量

FIG. 7 Threshold Voltage Shifts as Function of Total Dose with Bias as Parameter for Device CC4007RH Irradiated with 5MeV Proton ΔVthn: Threshold Voltage Shift for N-Channel Transistor; ΔVthp: Threshold Voltage Shift for P-Channel Transistor

从上面几个图中可以看出, 对于加固型NMOS 管来说, + 5V 的栅极辐照偏置不仅使漏电流增大, 而且在同样的辐照条件下, 界面态的生长也远大于0V 偏置, 说明界面态的生长需要一定的偏压条件;

并且在辐照初期,界面态的生长很慢,并且与偏压没有直接的关系,只是辐照到一定剂量(或辐照一定时间),在+5V偏置下的NMOS管界面态突然增加,说明界面态生长也需要一定的时间或一定的辐照剂量。

对于加固型PMOS器件,其界面态的产生也与偏压有着强烈的依赖关系,从图6中可以看出,-5V的辐照偏置使器件可以承受较高的吸收剂量,受照时间长,器件的界面态密度也远不如0V偏置下的高,说明对于加固的PMOSFET,界面态的产生与辐照偏压有关。

5 结论

从三种加固器件CC4007、NMOS、PMOS及两种商用器件CC4011、CC4069的实验结果来看,可以得到以下结论:

(1) MOS器件的质子累积电离辐射损伤对质子能量有较强的依赖关系,能量大,辐射损伤就大。分析原因:一方面由于质子能量大,造成的电离损伤就大;另一方面在相同的总剂量条件下,质子的能量越大,它的累积通量响应也越大,对器件敏感层造成的损伤增大。

(2) 射线辐照时器件所加偏压对器件的辐射效应也有明显的影响,对于NMOSFET,除加固型NMOS器件外,不论是加固CC4007还是非加固器

件CC4011,CC4069,+5V偏压不仅使阈值电压的漂移大于0V偏压情况,且漏电流有较大的增加。所用CC4007RH器件,虽然其栅氧化层进行了一定的加固,抗辐射性能有所提高,但其场氧化层没有进行很好的加固,致使其漏电流随吸收剂量增加明显增大;而所用的加固型NMOS,从其辐射效应来看,其场氧化层与栅氧化层一样,在制作工艺中进行了加固,辐照时其漏电流变化不大。

(3) 从加固型器件的质子辐射效应来看,在质子辐照下,界面态的生长需要一定的偏压条件及一定的时间或吸收剂量。

参考文献

- [1] R. W. Tallon, M. R. Ackermann, W. R. Kemp *et al.*, A Comparison of Ionizing Radiation Damage in MOSFETS from ^{60}Co Gamma Rays, 0.5 to 22MeV Proton and 1 to 7MeV Electrons, IEEE Trans. Nuc. Sci., 1985, **NS-32**(6): 4393—4398.
- [2] E. G. Stassinopoulos, O. van. Gunten, G. J. Bricker *et al.*, The Damage Equivalence of Electrons, Protons, Alphas and Gamma Rays in Rad-Hard MOS Devices, IEEE Trans. Nuc. Sci., 1983, **NS-30**(6): 4363—4367.
- [3] Fudan University, Tsinghua University and Peking University, ed., The Experiment Methods in Nuclear Physics, Beijing: The Atom Energy Publishing Housing, 1985, 37—83[复旦大学,清华大学,北京大学合编,原子核物理实验方法,北京:原子能出版社,1985,37—83].

Total Dose Effects of Protons on MOS Devices

WANG Gui-zhen, ZHANG Zheng-xuan, JIANG Jing-he, LUO Yin-hong,
PENG Hong-lun and HE Bao-ping

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

Abstract: The total dose effects of protons on the soft oxide MOS devices and rad-hard MOS devices are tested. Irradiated with 2, 5, 7 and 9MeV protons, the damage has been measured, respectively. It is indicated that the radiation damage of MOS devices, whether soft or rad-hard, varies with the energy of protons, i. e., higher energy protons will cause more damage. The radiation effects are different to MOS devices under the bias condition and under the zero gate bias condition. For hard-oxide N-channel transistor, the damage is more serious and the density of the interface traps bias condition is higher than that under zero bias condition, while for hard-oxide P-channel, the density under zero gate bias condition is higher than that under bias condition.

Key words: total dose effects; proton; Faraday cup; threshold voltage; leakage current

PACC: 5190; 1420 **EEACC:** 2560

Article ID: 0253-4177(2001)11-1468-06

WANG Gui-zhen female, was born in 1967, master and associate researcher. She is engaged in study of the measurement of radiation and the radiation effects of the devices.

Received 28 October 2000, revised manuscript received 2 January 2001

©2001 The Chinese Institute of Electronics