

注 F MOS 器件的可靠性研究

张国强 陆 妍 范 隆 余学锋 郭 旗 任迪远 严荣良

(中国科学院新疆物理研究所 乌鲁木齐 830011)

摘要 对注 F MOSFET 和 CC4007 电路进行了⁶⁰Co-γ 辐照和退火行为的分析研究,结果表明:栅介质中 F 的引入,能明显减小 CC4007 电路辐射感生阈电压的漂移和静态漏电流的增长;抑制高温贮藏引起的 CC4007 电路漏电流的退化,减小辐射感生氧化物电荷和界面态在退火过程中的再生长速度.F-Si 键的形成将减小 MOS 栅氧介质的电导率.

PACC: 7340Q; EEACC: 2550E, 2560R

1 引言

随着核技术和空间技术的发展,对其中广泛应用的 MOS(金属-氧化物-半导体)器件电路的抗电离辐射和可靠性物理研究日益受到重视.大量研究表明,MOS 器件受电离辐射作用后,它的典型参数(如阈电压、漏电流)会因栅场氧化层电荷积累和 Si/SiO₂ 界面态等的产生而发生退化,甚至导致功能失效,严重影响空间飞行器的使用寿命.因此,寻求提高 MOS 器件电路高可靠性的研究成为当前抗辐射微电子学领域中的一项重要课题.

近年来,探索向 Si/SiO₂ 栅介质注入 F 的方法来抑制电离辐射对 MOS 结构损伤的研究已取得了较大进展^[1~10].本文进一步报道通过向 MOS 栅介质引入 F,可以抑制辐射和高温引起的典型参数的退化,明显提高器件电路工作的可靠性.

2 实验样品及方法

实验所用样品为 Si 栅 CC4007 双互补对加反相器和单个 Si 栅 MOSFET(金属-氧化物-半导体场效应晶体管),分别制作在 3~4.5Ω·cm 的 N(100)Si 村底上,H₂+O₂ 栅氧化,栅氧化层厚度 50nm,多晶硅厚 500nm,注 F 工艺是淀积多晶硅后注入能量为 30keV 的 F 离子,注 F 剂量为 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 和 $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$.F 注入后采用高温氮气退火,通过热激活的作用把 F 引入 SiO₂ 栅介质中.

对 CC4007 电路,采用美军标 MIL-M-38510/53D 方法测试电路参数:阈电压 V_T 和漏

张国强 男,1962 年生,副研究员,主要从事 MOS 新栅场介质的电离辐射效应、机理和加固应用研究
· 陆 妍 女,1962 年生,工程师,主要从事线性集成电路的电离辐射效应、损伤机理、加固技术的研究
范 隆 男,1967 年生,助研,主要从事 MOS 集成电路电离辐射效应及应用研究
1996 年 3 月 3 日收到初稿,1996 年 5 月 23 日收到修改稿

电流(静态功耗电流) $I_{ss}(I_{ss}(0V))$:所有输入端为低电平; $I_{ss}(10V)$:所有输入端为高电平),对CC4007 电路的每个 MOSFET 以及单个 MOSFET, 测试 I_{ds} - V_{gs} 亚阈特性, 从而计算出氧化物电荷密度 N_{ot} 和界面态密度 D_{it} ^[4,6].

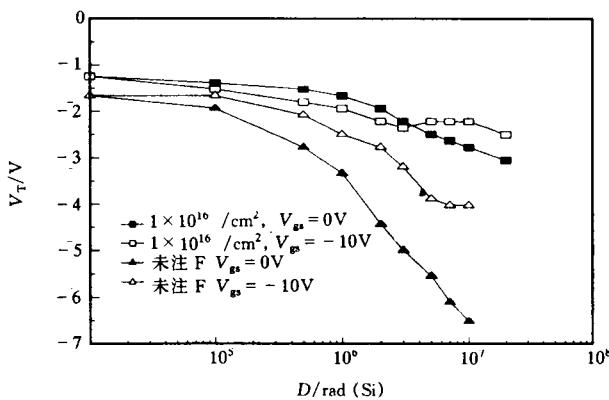


图 1 PMOSFET 阈电压与辐照剂量的关系

为 $V_{gs} = -10V$ 和 $0V$; NMOSFET 为 $V_{gs} = 10V$ 和 $0V$.

由图可见:①不同栅偏置辐照条件下,注 F 能明显抑制 PMOSFET 阈电压的负向漂移和 NMOSFET 的正向回漂(如 PMOSFET 在 $V_{gs} = 0V$ 偏置辐照下,当总剂量达到 $1 \times 10^7 \text{ rad(Si)}$ 时,注 F 样品的阈电压负向漂移仅为 $1.4V$,而未注 F 样品则为 $4.5V$). ②栅介质中 F 离子的引入能明显抑制辐照感生静态漏电流 $I_{ss}(0V)$ 的增加、特别是在 $1 \times 10^6 \text{ rad(Si)}$ 以后, $I_{ss}(10V)$ 随辐照的变化不大.

3 实验结果及讨论

3.1 CC4007 电路的辐照效应

图 1~3 所示的是未注 F (control) 和 $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 注 F 剂量 CC4007 电路的 P 沟 MOSFET(简称 PMOSFET) 和 N 沟 MOSFET(简称 NMOSFET), 阈电压和漏电流随辐照剂量率 $1.17 \sim 26.7 \text{ krad(Si)/min}$, 总剂量 $2 \times 10^7 \text{ rad(Si)}$. 辐照栅偏压: PMOSFET

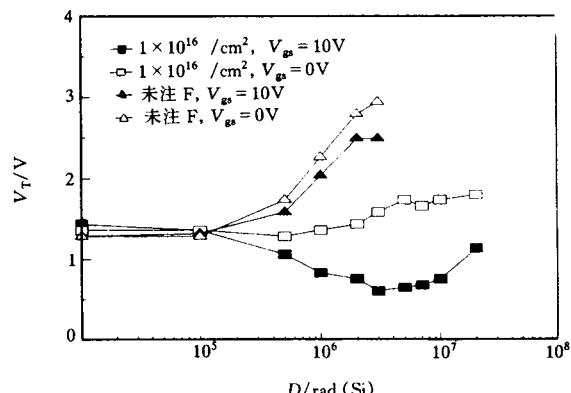


图 2 NMOSFET 阈电压与辐照剂量的关系

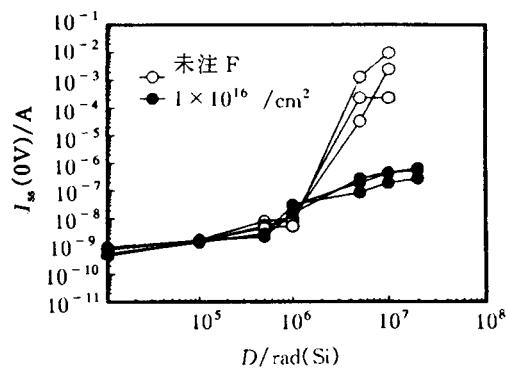
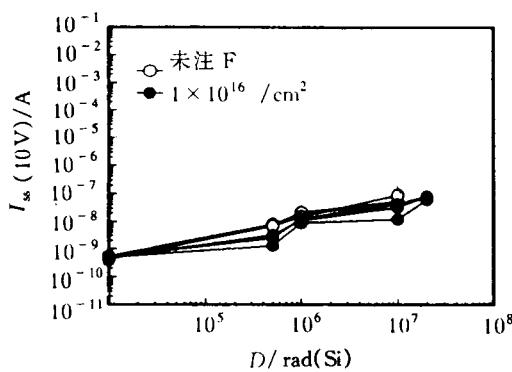


图 3 CC4007 电路漏电流随辐照剂量的变化关系

注 F 样品具有较小辐射感生阈电压漂移是因为栅介质中 F 的引入,能够明显减少辐射感生氧化物电荷的积累和 Si/SiO₂ 界面态的增长^[7].

注 F 样品较小的阈电压漂移和 SiO₂ 栅氧化层因 F 离子的引入引起电导率下降等原因是导致图 3 结果的主要原因.

F 所具有的释放 Si/SiO₂ 界面应力、替换部分 Si—H 弱键和 Si—O 应力键而形成较高键能的 Si—F 键^[5],是含 F 栅介质具有较强抗辐射特性的微观机制所在.

3.2 CC4007 电路的高温贮藏效应

MOS 器件电路经常要用于高温环境,其参数的退化将影响器件电路工作的可靠性.为此,对未注 F 和注 F 剂量为 $1 \times 10^{16} / \text{cm}^2$ 的 CC4007 电路进行了 125°C 高温贮藏 72 小时的试验、观察其典型参数 V_T 和 I_{ss} 在高温贮藏前后的变化. 高温贮藏在恒温箱中进行, 贮藏期间器件管脚短接, 72 小时贮藏结束后样品置于空气, 20 分钟后开始测试. 获得的贮藏前后阈电压和漏电流的变化如图 4 和图 5 所示.

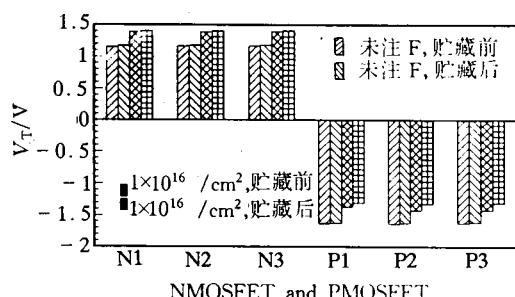


图 4 CC4007 电路 NMOSFET 和 PMOSFET
在 125°C 72 小时贮藏前后的阈电压值

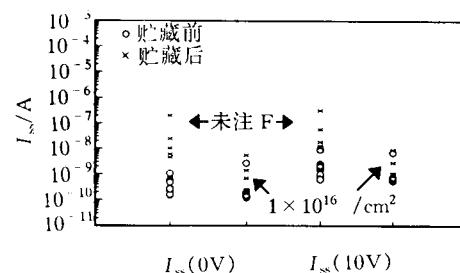


图 5 CC4007 电路漏电流在 125°C 72 小时
贮藏前后的变化关系

分析图中数据可得: 高温贮藏后, ①无论是注 F 还是未注 F, PMOSFET 和 NMOSFET 的阈电压都有很微小的正向漂移, ② $I_{ss}(0V)$ 和 $I_{ss}(10V)$ 都有明显的增加, 但注 F 样品的增加较小. 由此可见, 栅介质中 F 离子的引入能明显减小高温贮藏引起的 CC4007 电路漏电流的退化.

一般而言, CC4007 电路漏电流的增长主要归结为阈电压的漂移、场氧层漏电和场氧层绝缘性的变差. 场氧漏电由场氧电荷积累导致寄生沟道的形成而引起, 并且仅与 $I_{ss}(0V)$ 有关, 与 $I_{ss}(10V)$ 无关. 对本实验而言, 由于阈电压漂移很小, 并且由于 $I_{ss}(10V)$ 也有很大增加, 由此可以推断, I_{ss} 高温贮藏后的明显增大应归结为栅氧化层绝缘性的变差. 图 5 的结果表明栅介质中 F 离子的引入, 由于具有较高能量的 Si—F 键的形成, 部分替代了其它在高温条件下易于断裂的弱键和应力键, 从而减少了栅氧化层中由高温所引起的断键和电荷的积累以及其它点缺陷的形成, 提高了栅氧化层的绝缘性能, 减小了高温贮藏所引起 CC4007 电路漏电流的增长退化.

3.3 NMOSFET 的辐照后退火效应

MOSFET 辐照后的退火效应研究, 是考察器件可靠性能的重要内容. 辐照缺陷的退火行为直接与器件电路典型参数的退化相关, 尤其是 NMOSFET 辐照感生界面态在退火过程中出现的再增长, 将引起辐照退火后的阈电压大于辐照前的值, 出现所谓的“Rebound”现

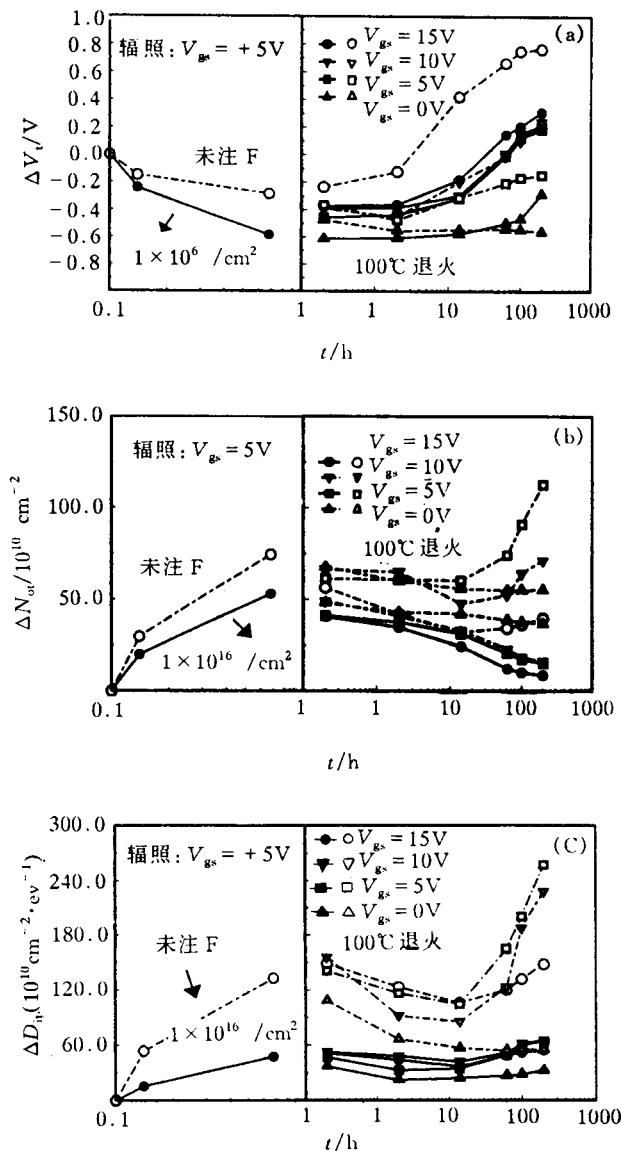


图 6 未注 F 和 $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 注 F 剂量的 NMOSFET 阈电压(a)、氧化物电荷(b)和界面态密度(c)随辐照和退火的时间响应关系

F 离子的引入将明显减小高温贮藏所引起的漏电流增长。

③NMOSFET 辐照后 100℃ 恒温退火, 将出现辐射感生缺陷的退火和再生长双重特性, 并受辐照栅偏压的制约。含 F 样品辐射感生氧化物电荷和界面态的再生长速度将明显小于未注 F 样品。

④MOS 栅介质中 F 的引入, 将形成较高能量的 Si—F 键, 从而减小栅氧介质的电导率。

象, 将严重影响器件工作的可靠性。

未注 F 和 $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 注 F 剂量的 NMOSFET 在 $5 \times 10^5 \text{ rad(Si)}$ 总剂量辐照后(辐照剂量率 $1.22 \times 10^4 \text{ rad(Si)/min}$, 辐照栅偏压 $V_{gs}=5\text{V}$), 处于 100℃ 恒温箱中进行恒温退火(退火栅偏压为 $V_{gs}=0, 5, 10, 15\text{V}$ 四种), 其阈电压、氧化物电荷和界面态密度随辐照和退火的时间响应关系示于图 6。

分析图中数据可以清楚地看到, 栅介质中 F 的注入, 将明显抑制辐射感生氧化物电荷和界面态在退火过程中的再生长速度。尤其是 $V_{gs}=5\text{V}$ 和 $V_{gs}=10\text{V}$ 两种退火栅偏置条件。辐照缺陷在退火过程中呈现退火和再生长双重特性, 并受栅偏压制约。

4 结语

本文通过分析研究注 F MOSFET 和 CC4007 电路的辐照响应和退火行为, 获得结果如下:

①栅氧化过程中引入一定量的 F 离子, 能够明显抑制辐射感生的 CC4007 电路 PMOSFET 阈电压负向漂移和 NMOSFET 阈电压正向回漂, 减小静态漏电流随辐照的增长。

②CC4007 电路 125℃、72 小时高温贮藏, 将出现较小的阈电压增加和较大的静态漏电流增长, 栅介质中

参 考 文 献

- [1] E. F. Dasilva, Y. Nishioka, T. P. Ma et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 1987, **34**(6): 1190.
- [2] K. P. Macwilliams, L. F. Halle and T. C. Zietlow, IEEE Electron Device Lett., 1990, **11**(1): 3.
- [3] Y. Nishioka, T. Itoga, K. Ohya et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 1990, **37**(6): 2026.
- [4] 张国强,余学锋,高文钰,等,固体电子学研究与进展,1993, **13**(1): 45.
- [5] 张国强,余学锋,高文钰,等,核技术,1993, **16**(6): 365.
- [6] 张国强,严荣良,余学锋,等,半导体学报,1994, **15**(1): 64.
- [7] Zhang Guoqiang, Yan Rongliang, Yu Xuefeng et al., Nuclear Science and Techniques, 1994, **5**(2): 124.
- [8] Zhang Guoqiang, Yan Rongliang and Ren Diyuan, "The annealing behavior of oxide trapped charges and interface traps in fluorinated NMOSFET", Proceedings of 20th IEEE International Conference on Microelectronics, Serbia, Yugoslavia, 1995, **1**(1): 269.
- [9] Zhang Guoqiang, Yan Rongliang, Gao Wenyu et al., "Ionizing radiation effects on mobility in fluorinated NMOSFET", Proceedings of the 4th International Conference on Solid and Circuit Integrated Techniques, Beijing, 1995, 99.
- [10] 严荣良,张国强,余学锋,等,核技术,1995, **18**(10): 610.

Study on Reliability of Fluorinated MOS Devices

Zhang Guoqiang, Lu Wu, Fan Long, Yu Xuefeng, Guo Qi,
Ren Diyuan and Yan Rongliang

(Xinjiang Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

Received 3 March 1996, revised manuscript received 23 May 1996

Abstract The character of $^{60}\text{Co}-\gamma$ irradiation and annealing in fluorine implanted CC4007 CMOS circuits and MOSFETs has been investigated. Experimental results have shown that radiation-induced shift of the threshold voltage and corresponding increase of static supply current in CC4007 circuits can be explicitly restrained by introducing minute amounts of fluorine ions into gate oxides. The more increase of static supply current induced by high temperature storage occurs in MOSFET and it controlled by implantation. The formation of F—Si bonds will reduce the conductivity of MOS gate oxides.

PACC: 7340Q; **EEACC:** 2550E, 2560R