

栅氧化方式对 N 沟输入 CMOS 运算放大器 电离辐射效应的影响

陆 妍¹ 郭 旗¹ 任迪远¹ 余学锋¹ 张国强¹ 严荣良¹ 王明刚² 胡浴红² 赵文魁²

(1 中国科学院新疆物理研究所, 乌鲁木齐 830011)

(2 西安微电子技术研究所, 西安 710054)

摘要: 介绍了干氧和氢氧合成两种不同栅氧化方式下制作的 N 沟输入 CMOS 运算放大器电路的电离辐照响应特征。并通过对电路内部单管特性损伤分析的比较, 探讨了引起两者辐照敏感性差异的原因。结果显示, 氢氧合成工艺比干氧工艺损伤明显的原因, 是因为 H 的引入产生了更多的界面态, 从而使其单管的跨导明显下降所致。这表明, 抑制辐照感生氧化物电荷尤其是界面态的增长, 对提高电路的抗辐射特性至关重要。

关键词: N 沟输入 CMOS 运算放大器; 跨导; 界面态; 电离辐照

EEACC: 2570D; 1220; 7910

中图分类号: TN 386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)05-0656-04

氢氧合成栅氧化二种不同工艺的 CMOS 运放电路, 并进行了辐照试验和分析比较。

1 引言

在电离辐射环境中应用的 CMOS 运算放大器电路, 由于受各种射线粒子辐照的影响, 其失调电压、开环增益等特性参数会逐渐劣化, 最终导致器件失效, 严重影响整个电子系统的可靠性运转。因此, 如何寻找到一条抑制电路特性退化的有效加固方法, 以提高其抗辐射能力, 已成为目前国内外抗辐射电子学领域十分关注的课题。

以往的研究表明, MOS 器件在电离辐射环境中的特性退化, 主要是由于在 SiO₂ 栅介质和 Si/SiO₂ 界面附近累积了大量的氧化物电荷和界面态。而这种陷阱电荷的形成与其工艺条件, 如氧化氛围、氧化温度及栅氧层厚度等都有密切的关系^[1-3]。因而, 选择一条优良的制作工艺, 对提高器件的抗辐射能力至关重要。栅氧化方式的选择通常是工艺筛选过程中必不可少的一个重要环节。一般认为, 不同的氧化氛围会使器件的抗辐照特性产生明显差异。因此, 为了研究 CMOS 运算放大器电路在不同氧化方式条件下的响应规律, 以及辐照感生的氧化物电荷和界面态对 CMOS 运放电路会有什么样的作用, 我们基于常规的 MOS 生产工艺, 分别设计制作了干氧和

2 实验样品和方法

实验样品的栅氧层厚度均为 40nm, 氧化氛围分别为干氧和氢氧合成。为了便于对实验结果进行分析, 运放电路被设计成由差分对、恒流偏置电路、放大级和输出级几个功能单元组成的既相互联系又相互独立的结构。在该电路中, 将各功能节点的接线引出可分别测试各单元的性能参数, 相互连接又可组成结构不同的整体运放电路, 以完成整体性能参数测试。

运放电参数测试由自制的计算机控制多功能自动采集测试系统完成。该测试系统不仅能完成运放电路各功能单元特性、输入差分单管特性和整体性能参数等的测试, 还能在两个相同样品(一个进行辐照, 一个不辐照)间进行各功能单元的替换, 以研究不同功能单元的辐射敏感性对运放电路辐射损伤的贡献。

辐照源为本所 5.37×10^{15} Bq 的 ⁶⁰Coγ 源, 辐照剂量率为 0.08Gy(Si)。在辐照期间, 将运放的两个输入端接地, 使之处于零偏状态, 同时电源电压接正负 5V 电压。

陆 妍 女, 高级工程师, 主要研究方向为运算放大器的工艺优化、可靠性及失效分析。

2000-04-19 收到, 2000-08-04 定稿

©2001 中国电子学会

辐照前后测试的电参数有:各单元子电路的节点电流、电压,差分对单管特性 $I-V$ 和跨导 g_m 及运放电路整体性能参数失调电压(V_{io})、共模抑制比(CMRR)等。上述所有参数测试在辐照后20min之内完成。

3 实验结果和讨论

图1、2分别给出了两种不同棚氧化方式下制作

的N沟输入CMOS运算放大器电路,典型的辐照敏感参数失调电压 V_{io} 和共模输入电压范围 V_{icm} 随辐照总剂量变化的关系。由图中可以看出,随着辐照总剂量的增加,两种工艺的 V_{io} 和 V_{icm} 都发生了较大变化。但相对而言,氢氧合成棚氧化方式下制作的CMOS运放电路,其电参数的变化要明显大于干氧工艺。可见,由于棚氧化方式的不同,两种电路对电离辐照的敏感性也存在较大差异。

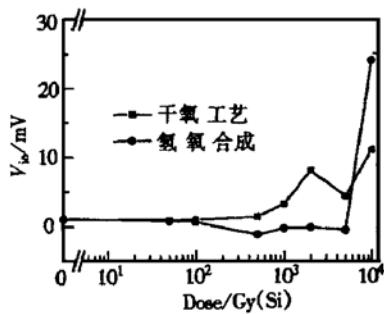


图1 失调电压 V_{io} 随辐照总剂量的变化

FIG. 1 V_{io} Versus Total Dose of Radiation

为了研究引起两种不同工艺CMOS运放电路辐照敏感性差异的原因,测量了其N沟差分对的亚阈特性 $I_{ds}-V_{gs}$ 随辐照总剂量的变化,如图3(a)、(b)所示。比较两图结果可以发现,虽然两种不同工艺样品亚阈特性 $I_{ds}-V_{gs}$ 的初始值无显著区别,但辐照后,氢氧合成工艺的负漂和畸变均明显大于干氧工艺。由于MOSFET的亚阈特性 $I_{ds}-V_{gs}$ 的变化是辐射感

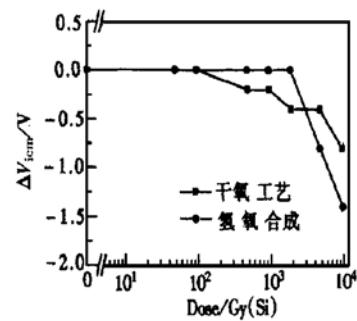


图2 共模输入范围 V_{icm} 随辐照的变化

FIG. 2 V_{icm} Versus Total Dose of Radiation

生 SiO_2 栅介质中氧化物正电荷积累和 Si/SiO_2 界面态增加的结果,氧化物电荷增加越多,曲线的负向漂移越大,而畸变的大小与辐射感生的界面态相对应。因此,从图3中可以看出,两种不同工艺之间的差别,是由于辐射感生的氧化物电荷和界面态含量的不同所造成的。

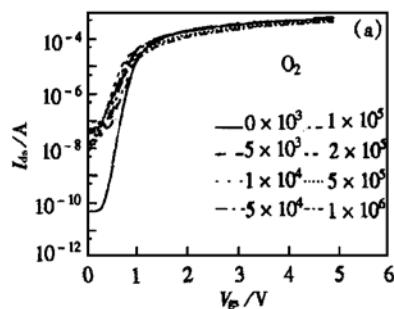
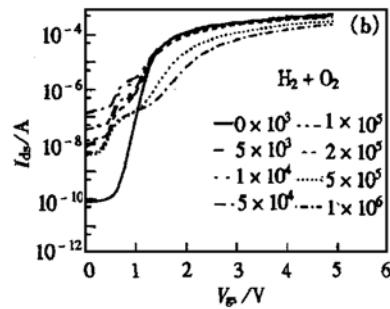


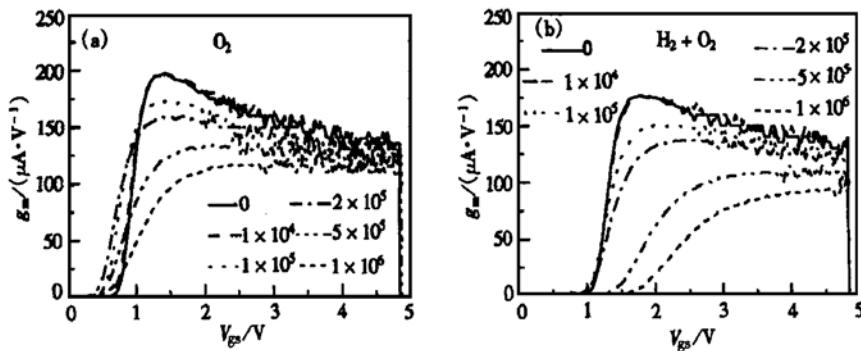
图3 两种不同工艺的NMOSFET亚阈特性 $I_{ds}-V_{gs}$ 随辐照总剂量的变化

FIG. 3 $I_{ds}-V_{gs}$ Curves of N Channel Differential Pair Versus Total Dose of Radiation

为了对电路的损伤进行更深入地分析,分别给出了表征线性电路线性区特性的重要参数跨导 g_m 在两种不同工艺中的变化,如图4(a)、(b)所示。图中显示,随着辐照总剂量的增加,在两种不同棚氧化



方式下,其最大线性跨导 g_m 均有明显下降。可以看出,干氧工艺的样品,在其跨导衰减的同时还有曲线负漂的现象。而氢氧合成的样品,几乎没有曲线的负漂,仅在伴随曲线下移的同时,有较大的斜率变化。

图 4 两种不同工艺的 N 沟差分对跨导 g_m 随辐照总剂量的变化FIG. 4 g_m - V_{gs} Curves of N Channel Differential Pair Versus Total Dose of Radiation

大量的研究表明, 跨导的退化主要是由于电离辐射在 MOSFET 的 Si/SiO₂ 界面或附近感生了氧化物电荷和界面态, 导致沟道载流子迁移率的变化而引起的^[4,5]. 近年来的研究又发现, 氧化物电荷和界面态对跨导的退化根据 MOSFET 沟道类型的不同还有较大区别. 它们满足以下的简单模型^[6]:

$$\Delta g_m = K g_{mo} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_n = 1/\alpha_{it}\Delta N_{it} + \alpha_{it}\Delta N_{it} \quad (\text{对于 NMOSFET}) \\ K_p = \alpha_{it}\Delta N_{it} + 1/\alpha_{ot}\Delta N_{ot} + \alpha_{it}\Delta N_{it} + \alpha_{ot}\Delta N_{ot} \end{array} \right. \quad (2)$$

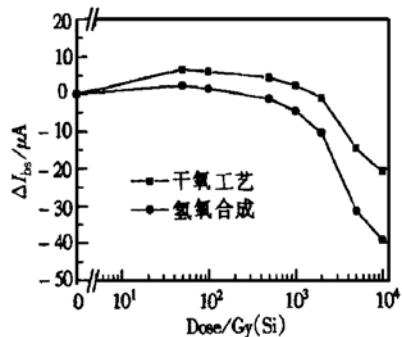
其中 K_n 和 K_p 分别表示 NMOSFET 和 PMOSFET 的跨导损伤因子; g_{mo} 和 g_m 分别表示辐照前后的跨导; ΔN_{it} 和 ΔN_{ot} 则分别代表辐照感生的界面态增加和氧化物电荷积累; 常数 α_{it} 和 α_{ot} 有两个意义, 其一, 是由于工艺变量参数决定的匹配参数; 其二, 它们分别描述了辐照感生界面态电荷和氧化物电荷对迁移率的影响程度. (2)式表明, 对 NMOSFET 来说, 界面态的影响对跨导的退化起决定性作用. 而对 PMOSFET, 除了界面态的影响外, 还要考虑氧化物电荷的贡献. 也就是说, 界面态密度的增加, 是导致 MOS 器件跨导变化的最重要因素. 对照图 4(a)、(b)的结果, 我们也确实观察到, 虽然干氧工艺比氢氧合成工艺有较多的氧化物电荷产生, 但由于氢氧合成工艺较之干氧工艺有更多的界面态形成, 反使其跨导的衰减比干氧工艺明显. 也就是说, 这一结果与上述跨导退化的模型是相一致的.

对线性模拟电路来说, 工作于饱和区的 MOSFET 电流 I_{DS} 和跨导 g_m 满足以下的关系式^[7]:

$$g_m^2 = 2\beta I_{DS} \quad (3)$$

其中 $\beta = \mu C_{ox} W/L$, 为 MOSFET 的增益因子. 当

器件 W/L 一定时, β 是常数. 因此, 当跨导 g_m 下降时, 其电流 I_{DS} 也会相应减小, 这种电流的变化最终也会影响到整个电路内部的工作状态, 因为 I_{DS} 与 I_{BS} 成比例变化. 图 5 中给出的两种不同工艺运放样品的内部偏置电流 I_{BS} 随辐照总剂量的增加而减小的状况, 正是这种电流改变的最好体现. 可以看出, 氢氧合成工艺的样品, 由于跨导的衰减明显, 其 I_{BS} 减小的幅度也相应较大.

图 5 两种工艺的偏置电流 I_{BS} 随总剂量的变化FIG. 5 I_{BS} of CMOS Amplifier with Different Process Versus Total Dose of Radiation

从整个运放电路来看, 由于运放电路的特性变化与电路内部各功能单元的匹配及偏置工作点的设置密切相关. 因此, 当 MOSFET 的特性改变影响了电路内部的工作状态时, 必然会导致电参数的变化, 正如在图 1、2 中 V_{io} 和 V_{icm} 所表现的那样. 氢氧合成工艺的样品之所以比干氧工艺敏感, 是因为在电离辐照过程中感生了较多的界面态. 而这种较多界面态的形成, 则是由于 H 的引入, 使得在栅介质中产生了大量的 Si—H 键, 这种 Si—H 弱键极易在辐照中被打断, 从而增加了产生界面态的机率^[8-10].

4 结论

两种不同栅氧化方式下制作的 CMOS 运算放大器电路的电离辐照实验结果表明, 辐照均能使两种工艺运放电路的电特性发生变化。但相对而言, 氢氧合成栅氧化方式下制作的运放样品, 其辐照敏感性要大于干氧工艺。这种差异主要是由于 H 的引入, 使得氢氧合成工艺较之干氧工艺有更多的界面态形成, 从而使其跨导的衰减更为明显的缘故。这些结果表明, 对 N 沟输入 CMOS 运放电路, 抑制辐射感生氧化物电荷尤其是界面态的增长, 对提高运放的抗辐射能力至关重要。

参考文献

- [1] G. F. Derbenwick and B. L. Gregory, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1975, **NS-22**(6) : 2151.
- [2] C. R. Viswanathan and J. Maserjian, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1976, **NS-23**(6) : 1540.
- [3] P. S. Winokur and H. E. Boesch, Jr., IEEE Trans. Nucl. Sci., 1980, **NS-27**(6) : 1647.
- [4] K. F. Galloway, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984, **NS-31**(6) : 1497.
- [5] F. W. Sexton and J. R. Schwank, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1985, **NS-32**(6) : 3975.
- [6] Ren Diyuan, Yu Xuefen, Lu Wu *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 1995, **16**(7) : 533—540(in Chinese).
- [7] Wang Guoding, Application of CMOS Analog Integrate Circuit, Shang Hai Science and Technology Publishing Company, 1985, 5.
- [8] A. G. Sabinis, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1985, **NS-32**(6) : 3905.
- [9] J. R. Schwank, D. M. Fleetwood, P. S. Winokur *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1987, **NS-34**(6) : 1152.
- [10] Ma T. P. and Dressendorfer Panl V., Ionizing Radiation Effect in MOS Devides and Circuits, JOHN WILEY & SONS Inc, 1989, 230.

Influence of Gate Oxide Growing Way on Radiation Effects of CMOS Op-Ampl

LU Wu¹, GUO Qi¹, REN Di-yuan¹, YU Xue-feng¹, ZHANG Guo-qiang¹, YAN Rong-liang¹,
WANG Ming-gang², HU Yu-hong² and ZHAO Wen-kui²

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

(2 Xi'an Microelectronics Techniques Institute, Xi'an 710600, China)

Abstract: The total dose effects of two types of CMOS op-amps whose transistor gates are produced with dry O₂ and H₂+O₂ process, respectively, have been investigated. Comparing the radiation effects between the two circuits and their inner transistors, the causes of the difference between the two amplifiers' sensitivity to the irradiation is explored. It is shown that owing to the introduction of H in the process of gate oxide growing, more interface states are introduced in the irradiation, as makes the transconductance of H₂+O₂ device have much more degradation in the irradiation than the dry O₂ device. A conclusion is drawn that more attention should be paid to the way of gate oxide growing, which is one of the key factors influencing the performance of op-amplifiers in the total dose radiation environment.

Key words: CMOS operational amplifier; transconductance; interface states; ionizing

EEACC: 2570D; 1220; 7910

Article ID: 0253-4177(2001)05-0656-04

LU Wu senior engineer, her research areas include the reliability and damage analysis as well as the processes optimum of op-amps.

Received 19 April 2000, revised manuscript received 4 August 2000

©2001 The Chinese Institute of Electronics