

环境温度、电离辐射剂量率对 NMOSFET 器件特性参数的影响

何宝平 姚育娟 彭宏论 张正选

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 研究了辐射环境温度、辐射剂量率、退火温度和退火偏置对 CC4007 NMOS 器件阈值电压的影响。研究发现, 低温 (-30°C) 辐照感生的氧化物陷阱电荷比室温 (25°C) 多, 界面态电荷比室温要少; 受不同 γ 剂量率辐射时, 阈值电压的漂移程度不一样, 在总剂量相同情况下, 辐射剂量率高时, 阈值电压的漂移量也大; 辐照后, NMOS 器件 100°C 退火速度要大于 25°C 退火速度, $+5\text{V}$ 栅偏压退火情况要大于浮空偏置情况。并对以上现象进行了分析和解释。

关键词: 温度; 剂量率; 总剂量; 退火

PACC: 6180E EEACC: 2560R

中图分类号: TN 386.1 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2001)06-0779-05

1 引言

目前国内外有关 MOS 电路研究热点^[1]主要集中在低剂量率总剂量辐照效应, 以及辐照中高剂量率模拟低剂量率辐照环境的方法上。对于 MOS 器件在多种电离辐射环境中的效应差异, 如在高低温情况下, 不同 γ 总剂量、剂量率的辐照损伤及损伤恢复与退火时间、退火温度及退火偏置的关系研究, 国内较详细的报道不多。本文主要研究了 CC4007 NMOS 器件在不同 γ 剂量率辐照下的总剂量、剂量率效应以及不同偏置下的高温 (100°C) 和室温 (25°C) 的退火效应, 同时还研究了低温 (-30°C) 和室温 (25°C) 下的电离辐射效应差异。得出的实验结论, 对 MOS 结构电离辐照损伤机制的研究, 对进一步开展 MOS 器件的加固工艺, 以适应低温辐照环境的应用提供了重要依据。

2 样品及辐射实验

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 型 (100) 晶向, 电阻率为 $1\text{--}2\Omega \cdot \text{cm}$ 。制备工艺采用 $3\mu\text{m}$ 硅栅工艺, 栅氧化层制备工艺为干氧氧化, 氧化温度为 1000°C , 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。(1)为了研究总剂量和剂量率效应, 我们选取的 γ 射线剂量率有: $44 \times 10^{-2}\text{Gy(Si)/s}$ 、 $2.3 \times 10^{-2}\text{Gy(Si)/s}$ 、 $1 \times 10^{-2}\text{Gy(Si)/s}$ 、 $0.1 \times 10^{-2}\text{Gy(Si)/s}$ 四种;(2)为了研究辐射环境温度对器件的影响, 我们选取 $0.1 \times 10^{-2}\text{Gy(Si)/s}$ 的 γ 剂量率, 实验中将器件分别置于低温 (-30°C)、室温 (25°C);(3)为了考察辐照后器件的退火效应, 我们将器件在 $44 \times 10^{-2}\text{Gy(Si)/s}$ γ 剂量率下一次辐照到 $1 \times 10^3\text{Gy(Si)}$ 总剂量, 然后将器件分成两部分, 一部分在 100°C 下退火 175h , 另一部分在 25°C 下退火 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。

辐射偏置: $V_{\text{GS}} = V_{\text{DD}} = +5\text{V}$, $V_{\text{SS}} = 0\text{V}$; 退火偏置: (1) $V_{\text{GS}} = V_{\text{DD}} = +5\text{V}$, $V_{\text{SS}} = 0\text{V}$; (2) 浮空

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

何宝平 男, 1969 年出生, 助理工程师, 现从事辐射效应研究工作。

2000-04-22 收到, 2000-07-05 定稿

©2001 中国电子学会

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。

3 实验结果及分析

阈值电压是表征 MOS 器件的一个基本参量，在电离辐射环境中，MOS 电路阈值电压的变化主要是由于 Si/SiO₂ 界面氧化物陷阱电荷和界面态电荷密度的变化而引起的，因此，利用亚阈分离技术^[2]将阈值电压的漂移分离为完全由氧化物陷阱电荷和界面态电荷而引起的漂移量(ΔV_{ot} 和 ΔV_{it})即： $\Delta V_{th} = \Delta V_{ot} + \Delta V_{it}$ ，其中， $\Delta V_{ot} = \Delta V_{mg}$ 。界面态电荷密度 ΔN_{it} 和氧化物陷阱电荷密度 ΔN_{ot} 是利用如下公式求得：

$$\Delta N_{it} = \frac{C_{ox}}{q} |\Delta V_{th} - \Delta V_{mg}|, \Delta N_{ot} = \frac{C_{ox}}{q} |\Delta V_{mg}|$$

对 n 沟 MOS 器件而言，氧化物陷阱电荷的增加引起阈值电压的负向漂移，界面态的增加将引起阈值电压的正向漂移。器件在加电电离辐照过程中，n 沟 MOS 器件始终处于正偏置状态，p 沟 MOS 器件处于零偏置状态，由于在辐照过程中 CMOS 电路中 p 沟 MOS 管始终处于零偏置状态，辐射对其影响不大，所以本文只讨论 NMOS 器件的电离辐射效应。

3.1 辐照前后及退火 175h I-V 特性曲线的比较

MOS 晶体管的总剂量效应主要体现在 I-V 曲线的变化上。CC4007 NMOS 器件受 γ 射线 (44×10^{-2} Gy(Si)/s) 辐照前后以及退火 175h 的 I-V 曲线变化如图 1 所示。实验发现，NMOS 器件经过 1×10^3 Gy(Si) 剂量辐照后，辐射感生的氧化物陷阱电荷起显著作用，从而导致亚阈曲线发生负向漂移。再经过 175h 的 100℃ 退火后曲线正向回漂超过初始状态，这说明界面态电荷起主要作用。虽然 I-V 亚阈曲线经 175h 的退火正向回漂超过初始值，但退火后曲线斜率与辐照前比较显著下降，由于亚阈曲线斜率的畸变一定程度反映了辐射感生界面态电荷的多少，所以器件经过 175h 的 100℃ 退火后，一方面氧化物陷阱电荷发生退火，另一方面界面态电荷继续增加。

另外，实验还发现，器件受辐照后，亚阈区域泄漏电流显著增加。一般情况下，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

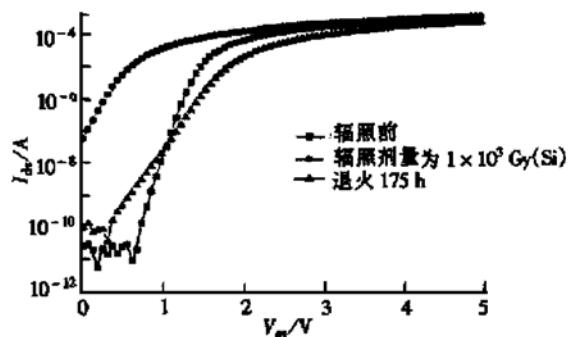


图 1 NMOSFET I-V 曲线在辐照前、辐照后及退火后的变化

FIG. 1 I-V Characteristics of NMOSFET Before and After Radiation and after Annealing

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 NMOS(栅氧化层区)管并联的辐射寄生 NMOS 管。实际上源漏电流是由本征管和寄生管两部分组成，一定剂量辐射后，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，寄生管和本征管的工作点将不同。当本征管还处在亚阈区时，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 NMOS 器件的阈值区特性。

3.2 室温辐照和低温辐照对器件参数的影响

实验中，我们还研究了辐射环境温度对器件特性的影响。图 2、3 分别给出了在剂量率 0.1×10^{-2} Gy(Si)/s 的辐照下，CC4007 NMOS 器件阈值电压的漂移量、辐射感生电荷密度随辐射剂量的变化关系。从图 2 中我们可以看出，器件在不同温度的环境中受辐射时，阈值电压的漂移量是不同的，并且在相同的总剂量情况下，低温辐照时器件阈值电压漂移量要大于室温的情况。

从图 3 中可以看出，低温 (-30℃) 辐照感生的氧化物陷阱电荷比室温 (25℃) 多，界面态电荷比室温要少。这主要是因为器件在室温条件下辐照时，在 SiO₂ 层中均匀地产生电子-空穴对，正电场的作用使空穴向 Si/SiO₂ 界面输运，被 Si/SiO₂ 界面约 20nm 范围内的空穴陷阱所俘获，成为带正电的氧化物电荷。空穴输运的同时释放出氢，扩散到 Si/SiO₂ 界面的氢与界面处的应力键和硅中的电子结合而形成新

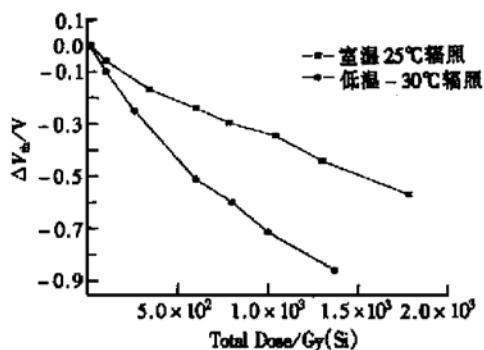


图 2 25°C 和 -30°C 下, NMOS 器件 ΔV_{th} 随辐射剂量的变化

FIG. 2 ΔV_{th} Versus Radiation Dose for NMOS Device at 25°C and -30°C

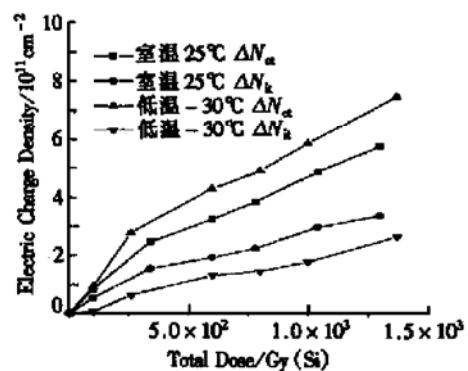


图 3 25°C 和 -30°C 下, NMOS 器件辐照感生电荷密度随辐射剂量的变化

FIG. 3 Radiation Introduced Charge Density Versus Radiation Dose for NMOS Device at 25°C and -30°C

的界面态^[3]。低温辐照时, 辐照在氧化层中产生的电子仍具有较高的迁移率, 在电场的作用下, 被扫出 SiO_2 膜, 由于低温时, 氧化层中各类空穴陷阱增多, 空穴的迁移率很低, 增大了对空穴的俘获几率。假设俘获空穴密度在靠近栅极氧化层界面处以 $\exp(-x/d)$ 的方式减小, 式中 $d \equiv \mu \tau Q x$ 为空穴平均传输距离^[4], 此时, 空穴的俘获不再发生在 Si/SiO_2 界面附近的空穴内, 正电场的作用, 使氧化层中产生的空穴以 d (为空穴的平均传输距离) 向硅衬底输运, 仅仅在靠近栅极与氧化层界面处俘获空穴密度很少。同时, 在低温下, 仍有比室温时少得多的空穴到达 Si/SiO_2 界面与应力键和硅中电子结合而形成界面态, 所以低温辐照感生的氧化物陷阱电荷比室温多, 界面态电荷比室温要少。

3.3 不同辐射剂量率对器件参数的影响

目前研究已经证实, CMOS 器件的辐射效应受辐射剂量、辐射剂量率、辐射时间、温度、生产工艺等多种因素的影响。其中, 辐射剂量率对辐射效应的影响尤为重要, 受不同的剂量率辐射后, 器件的失效机理和失效水平是不同的^[5]。图 4 给出了 CC4007 NMOS 器件受不同剂量率 γ 射线辐照时, 阈值电压随辐射剂量的变化关系。

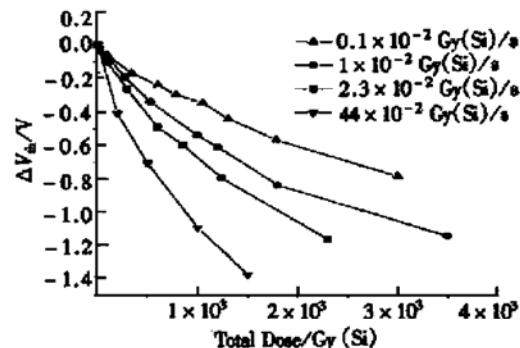


图 4 不同 γ 射线剂量率辐射下, NMOS 器件 ΔV_{th} 随辐射剂量的变化

FIG. 4 ΔV_{th} Versus Radiation Dose for NMOS Device, Under Different γ -Rays Dose Rate Irradiation

从图 4 中我们可以看出, 阈值电压随辐射剂量的增加而向负电压方向增加, 这是因为相对低剂量辐射而言, 在高剂量辐射下, 辐射感生的电子-空穴对较多, 辐射诱导的感生电荷亦较多的结果所致。同时从图中还观察到, 受不同剂量率辐射时, 器件阈值电压的漂移程度不一样。在相同的剂量照射的情况下, 阈值电压的漂移量随辐射剂量率的增加而增加。这是因为在高低剂量率辐照下, 氧化的陷阱电荷和界面电荷的相对密度大小不同, 导致阈值电压的漂移量发生差异。在低剂量率下的效应, 是氧化物陷阱电荷随时间的增加产生的退火效应与界面态陷阱电荷随时间的增加而增长效应的综合。在高剂量率下, 失效主要由氧化物陷阱电荷引起的阈值电压负向漂移引起。在剂量率适中的情况, 氧化物陷阱电荷量一定程度的下降, 界面态陷阱则一定程度的增加, 两者的效应可能会抵消。不同剂量率下的效应不同, 主要是氧化物陷阱电荷和界面态陷阱的贡献有差异。

3.4 退火温度和退火偏置对器件参数的影响

电离辐射主要在 SiO_2 内及 $\text{Si}-\text{SiO}_2$ 界面处形成损伤: 建立正电荷和形成界面态。在辐射后几秒乃至几年的时间内, 这种总剂量的损伤将产生退火, 界面俘获的空穴电荷与硅中越过界面势垒的隧道电子产生复合而消失。实验已证实, CMOS 器件的退火行为与器件工艺、辐射时偏置、剂量率、总剂量、和辐射后环境温度以及状态有关。图 5 给出了 CC4007 NMOS 器件受辐射剂量率为 $44 \times 10^{-2} \text{ Gy(Si)}/\text{s}$, $1 \times 10^3 \text{ Gy(Si)}$ 的总剂量辐照后, 在 100°C 和 25°C 不同偏置条件下阈值电压漂移量随退火时间的变化关系。

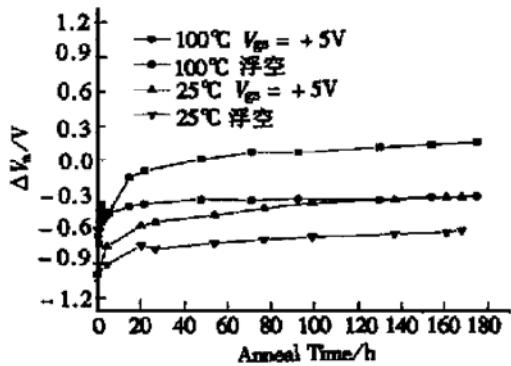


图 5 不同偏置条件下, NMOS 晶体管 ΔV_{th} 随退火时间的变化

FIG. 5 ΔV_{th} Versus Annealing Time for NMOS, Under Different Bias Voltages

从图 5 中可以看出, $+5\text{V}$ 栅偏压退火情况下, 阈值电压恢复速度快、恢复程度大。这可能是由于正电场使得衬底中的电子穿过隧道进入 SiO_2 层, 中和了那里的氧化物陷阱电荷。因此, 无论是室温还是高温, 电场的加入都加速了氧化物陷阱电荷的退火。浮空偏置时的退火速度要小于 $+5\text{V}$ 栅偏压情况。因此在预估 MOS 器件空间运行寿命时, 必须考虑偏压状态。

无论在哪种条件下退火, 阈值电压的回漂, 在退火前 20h 内大部分完成, 在退火后期基本饱和, 变化很缓慢。NMOS 晶体管的阈值电压辐照后反向恢复, 有的甚至超过了辐照前值, 即通常所说的“回弹”^[6]。组成阈值电压的两个分量: V_{th} 和 V_{ot} 在退火时表现不同, 辐照时引起阈值电压负漂的氧化物陷阱电荷在退火过程中被中和, 引起阈值电压正漂, 界面态在退火过程中产生, 也使阈值电压正漂, 两者综合

的结果, 可能使阈值电压超过辐照前值。

图 6 中给出了辐照后 NMOS 器件在不同偏置条件和退火温度下, 由界面态电荷引起的阈值电压漂移量 ΔV_{th} 随退火时间的变化关系, 从图中可以看出, 不同退火温度和偏置条件下, ΔV_{th} 恢复速度、恢复程度不一样: $+5\text{V}$ 栅偏压条件下, 100°C 退火的 ΔV_{th} 增加量要大于 25°C 情况; 同样, 浮空偏置条件下, 100°C 退火的 ΔV_{th} 增加量要大于 25°C 情况。 100°C 退火温度“加速”了 ΔV_{th} 的变化。

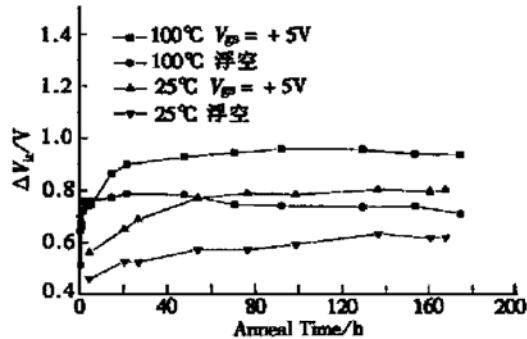


图 6 不同偏置条件下, NMOS 晶体管 ΔV_{th} 随退火时间的变化

FIG. 6 ΔV_{th} Versus Annealing Time for NMOS, Under Different Bias Voltages

此次实验也说明, 在室温下对器件进行高剂量率辐照, 然后进行高温 100°C 退火, 是有可能模拟器件在空间低剂量率环境下的行为。目前的研究表明, 模拟低剂量率辐照有以下几种可选方法^[7]: (1) 多次小的总剂量、高剂量率辐照然后室温退火, 因此平均剂量率很低, 但所用时间与实际低剂量率辐照所花的时间一样多; (2) 单次大剂量、高剂量率辐照然后 100°C 退火 168h , 但不能提供完整的 ΔV_{th} 与剂量的关系曲线; (3) 多次小的总剂量、高剂量率辐照短时间 100°C 退火, 能提供完整的 ΔV_{th} 与剂量的关系曲线, 目前第三种方法最有效。

由图 5、6 可以看出, 虽然 25°C 等温退火速度缓慢, 但除了模拟器件低剂量率辐照外, 在器件筛选方面, 25°C 的退火效应也有一定的意义: 虽然方法 1019.4 能成功地筛选出可能在空间失效的器件, 但是, 也有一些实验证实, 按照方法 1019.4 筛选出许多失效器件, 实际上是由于氧化物电荷退火而能够在空间正常运行, 所以, 在新制定的 TM 1019.5^[8] 中, 50% 附加剂量辐照前增加了 168h 25°C 的退火, 以此来防止屏蔽掉可能在空间正常运行的器件。

4 结论

通过研究 CC4007 NMOS 器件的 γ 辐照和退火响应, 我们可以得出以下结论:

(1) NMOS 器件受辐照后, $I-V$ 曲线发生负向漂移, 受照的总剂量越大, 负漂移越严重; 同时, 曲线斜率变小. 经过 175h 的 100°C 退火后曲线正向回漂超过初始曲线.

(2) NMOS 器件受不同的剂量率辐射时, 由于氧化物陷阱电荷和界面态的贡献有差异, 导致阈值电压的漂移程度不一样. 阈值电压的漂移量随辐照剂量的增加而增加, 而且在相同的总剂量照射的情况下, 阈值电压的漂移量也随辐射剂量率的增加而增加.

(3) 辐照后, NMOS 器件 100°C 退火速度要大于 25°C 退火速度. 但无论是室温还是高温, 阈值电压恢复速度, + 5V 栅偏压退火情况要大于浮空偏置情况. 阈值电压的回漂, 在退火前 20h 内大部分完成, 在退火后期基本饱和, 变化很缓慢.

参考文献

- [1] P. Khosropour, D. M. Fleetwood *et al.*, Evaluation of a Method for Estimating Low-Dose-Rate Irradiation Response of MOSFET, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1994, **NS-41**(6): 2560.
- [2] P. J. Mewhorter and P. S. Winokur, Appl. Phys. Lett., 1986, **48**(2): 133.
- [3] M. Knoll, D. Brauning and W. R. Fahrner, Generation of O-xide Charge and Interface States by Ionizing Radiation and by Tunnel Injection Experiments, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1982, **NS-29**: 1471.
- [4] N. S. Saks and M. G. Ancana, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984, **NS-31**: 1249.
- [5] P. J. Mewhorter *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1990, **NS-37**: 1962.
- [6] A. J. Lelis, T. R. Oldham, W. M. Delancey, Response of Interface Traps During High Temperature Anneals, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1991, **38**(6): 1590—1597.
- [7] William C. Jenkins, A comparison of Methods for Simulating Low Dose-Rate Gamma Ray Testing of MOS Device, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1991, **38**(6): 1560—1566.
- [8] C. M. Michael, New Test Procedure Simulates Low Dose Rate Effect for CMOS Technology, Commercialization of Military and Space Electronics, 1999, 7—10.

Influence of Temperatures and Radiation Dose Rate on CMOS Device Characteristic Parameter

HE Bao-ping, YAO Yu-juan, PENG Hong-lun and ZHANG Zheng-xuan

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

Abstract: The influences of environments with different radiation, γ dose rates and temperatures, as well as those of the annealing bias on the threshold voltage of CC4007 NMOS device have been reported in this paper. It is found that the radiation-introduced oxide trapped charges at a low temperature (-30°C) are more than those at room temperature (25°C), while the radiation-introduced interface trapped charges at a low temperature (-30°C) are less than those at room temperature (25°C). When the NMOS device is radiated by γ -rays, with different dose rate the shift of threshold voltage is also different, which is larger under a high dose-rate condition than that under a low dose-rate one, if the total dose radiation is same. After radiation, the annealing speed of NMOS device at 100°C is faster than that at 25°C temperature. The annealing speed of NMOS device under 5V bias is greater than that without bias. The above-mentioned phenomenon have been analyzed.

Key words: temperature; dose rate; total dose; annealing

PACC: 6180E EEACC: 2560R

Article ID: 0253-4177(2001)06-0779-05

HE Bao-ping was born in 1969. He is currently an associate engineer. He is engaged in the research work on radiation effect on the semiconductor devices.