

MOSFET 的电离辐照效应

高文钰 严荣良 余学峰 任迪远 范 隆

(中国科学院新疆物理研究所, 乌鲁木齐, 830011)

1991年4月1日收到, 91年7月17日修改定稿

本文研究了 MOSFET 的电离辐照效应, 给出了辐照在 MOSFET 栅介质中引起氧化物电荷对阈电压的贡献与辐照剂量和栅偏置电场的相互依赖关系。结果表明, 辐照引起的氧化物电荷与管子的沟道种类无关。另外, 漏源电压对 MOSFET 的辐照响应也有影响。统计数据表明, 对管子阈电压漂移有贡献的界面态的能级范围大约为 $E_t/2$ 。对实验结果进行了讨论。

EEACC: 2560R, 2530F

一、引 言

MOSFET 是组成 MOS 集成电路的最基本单元, 研究它的电离辐照效应对器件的加固工艺和辐照场中的可靠性研究有重要意义。大量研究表明, 电离辐照引起 MOS 器件的最主要性能退化是阈电压漂移, 并认为是由电离辐照感生的 Si/SiO₂ 界面态和栅氧化层中氧化物电荷引起^[1,2]。另外, Distefano^[3] 等认为氧化物电荷对栅击穿有重要作用。因此揭示这些参量的辐照响应规律是认识器件在辐照环境中可靠性退化的关键。不少文献报道了不同偏置下 MOS 电容中氧化物电荷和界面态的电离辐照响应^[4,5], 但缺乏系统研究 MOSFET 的辐照偏置和总剂量响应特性, 对阈电压漂移机制也需要深入研究, 尤其是关于界面态对阈电压有贡献的能级范围。为此, 本文应用 $I-V$ 亚阈特性测量了 MOSFET 中氧化物电荷和界面态对阈电压的贡献及阈电压漂移, 研究了氧化物电荷随辐照偏置和总剂量的变化规律, 并得到了对阈电压有贡献的界面态能级范围。

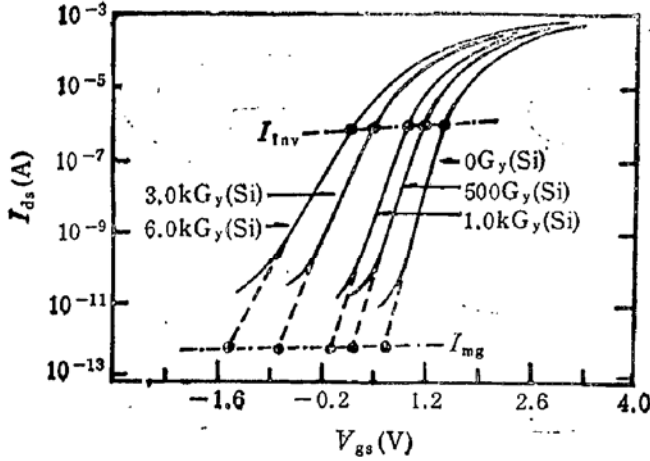
二、实验与测试

实验所用的 MOSFET 是基于常规 MOS 工艺生产线, 在 N 型 Si 衬底上制得沟道长为 8 μm , 宽为 300 μm 的 P 沟晶体管, 在衬底上扩 B 以形成 P 型区, 并制得沟道长为 8 μm 宽为 360 μm 的 N 沟晶体管。栅氧化温度为 1000°C, 气氛为纯干氧, 栅氧化层厚度为 84 nm, 并在氮气氛中退火 30 分钟, 栅极采用钨丝蒸铝工艺制得。场氧制备是采用干-湿-干加固工艺。每个芯片上都分别有二个 N 沟和 P 沟晶体管, 用双列直插式管壳和柯伐合金片封装。

样品辐照在本所 ⁶⁰Co γ 源上完成。辐照剂量率为 50 Gy(Si)/min, 辐照后参数测

试在 30 分钟内完成。应用 MOSFET 的 $I-V$ 亚阈特性曲线可得到半带点和反型点, 如图 1 所示。根据 MOSFET 的 $I-V$ 特性理论^[7], 漏源电流有下列关系式:

$$I_{ds} = \mu_n \left(\frac{Z}{L} \right) \frac{\alpha C_{ox}}{2\beta^2} \left(\frac{N_i}{N_D} \right)^2 (1 - e^{-\beta V_{ds}}) e^{\beta\phi} (\beta\phi)^{-1/2}, \quad (1)$$



$W/L = 360/8$ $V_{gs} = 10V$ $V_{ds} = 0V$

图 1 N 沟 MOSFET 的 $I-V$ 亚阈特性曲线及对应半带点和反型点

式中, $\beta = q/kT$; Z/L 为 MOSFET 的宽长比; N_D 为沟道掺杂浓度; N_i 为 Si 的本征载流子浓度; C_{ox} 为单位面积的栅电容; ϕ 为 Si 表面势; I_{ds} , V_{ds} 分别代表漏源电流和电压。常数 α 由下式求得

$$\alpha = 2 \frac{\epsilon_{Si}}{\epsilon_{ox}} \frac{d}{L_D}. \quad (2)$$

d 为栅氧化层厚度; L_D 为德拜长度; ϵ_{Si} , ϵ_{ox} 为 Si 和 SiO_2 的介电常数。(1) 式中 μ_n 为 MOSFET 的载流子迁移率, 它是一个辐照敏感参数, 它和阈电压 V_{th} 可由萨氏方程求得:

$$I_{ds} = \frac{Z}{L} \mu_n C_{ox} [(V_{gs} - V_{th})V_{ds} - V_{ds}^2/2]. \quad (3)$$

当 V_{ds} 很小, 满足 $V_{ds} \ll V_{gs} - V_{th}$ 时, 上式可简化为

$$I_{ds} = \frac{Z}{L} \mu_n C_{ox} (V_{gs} - V_{th}) V_{ds}. \quad (4)$$

上式就是测量 μ_n 和 V_{th} 的理论依据。一般情况下, $I-V$ 曲线测试取 $V_{ds} = 0.1V$ ^[8]。界面态密度的计算是根据文献^[1]给出的计算公式:

$$D_{it} = \frac{1}{q} \left\{ \left[\frac{\beta}{\frac{\partial \ln(I_{ds})}{\partial V_{gs}}} - 1 \right] C_{ox} - C_D \right\}, \quad (5)$$

其中,

$$C_D = \left[\frac{q\epsilon_{Si}N_D}{2(\phi_s + kT/q)} \right]^{1/2}, \quad \phi_s = \frac{3}{2} \phi_B = \frac{3}{2} \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D}{N_i} \right). \quad (6)$$

根据(4)式可求出 V_{th} 和 μ_n , 将 μ_n 代入(1)式, 求得

$$\phi = \phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D}{N_i} \right)$$

处的半带点电流 I_{mg} , 延伸 $I-V$ 亚阈曲线可找到对应的 V_{mg} , 氧化物电荷引起的电位差 ΔV_{ox} 即为辐照前后的半带电压差 ΔV_{mg} ^[9], 反型点电流 I_{inv} 对应于 ϕ 等于 $2\phi_B$, 从 $I-V$ 曲线上可以找到对应的 V_{inv} 。用 ΔN_{it} 表示半带到反型之间的界面态增长, 则有以下关系式^[9]:

$$\Delta V_{ot} = \Delta V_{ms}, \quad (7)$$

$$\Delta N_{it} = \frac{C_{ox}}{q} |\Delta V_{it}| = \frac{C_{ox}}{q} |\Delta V_{inv} - \Delta V_{ms}|. \quad (8)$$

以上就是测试 MOSFET 辐照响应敏感参数的基本原理,已有许多研究表明,以上方程对长沟 MOS 晶体管符合得很好^[1,2,8]. $I-V$ 特性测试和数据处理都已微机化,测试精度高,速度快,并且数据处理程序方便快捷.

三、结果与讨论

1. 氧化物电荷与剂量和栅偏置依赖关系

图 2 给出 N 沟和 P 沟晶体管在几组偏置电场下的 ΔV_{ot} 随总剂量 D 的变化. 可以看出,正栅偏置下, ΔV_{ot} 与 D 的关系在剂量小于 5×10^3 Gy(Si) 范围内可拟合为指数关系,但剂量到 5×10^3 Gy(Si) 以后, ΔV_{ot} 随 D 增加有饱和趋势;负栅偏置下, ΔV_{ot} 随 D 的变化也可拟合为指数关系,但只为相同剂量正偏置辐照时的 $\frac{1}{10} - \frac{1}{6}$. 从电离辐照的微观物理过程分析,辐照在 SiO_2 层内产生大量电子-空穴对,在正栅偏电场作用下,电子向栅极运动,从而使在 Si/SiO₂ 界面附近的空穴被俘获的几率增大,形成了对 Si 表面势影响明显的氧化物正电荷. 在负偏置电场下辐照时,电子向 Si/SiO₂ 界面运动,增大了 Si/SiO₂ 界面附近辐照产生空穴的再复合几率,也就减少了这区域的正电荷形成. 尽管在 Al/SiO₂ 界面附近和 SiO_2 层内仍有较多的正电荷形成,但它们距离 Si/SiO₂ 较远,对 Si 表面势影响较小,故 ΔV_{ot} 要比正偏时小很多.

正偏下 ΔV_{ot} 在大剂量后出现饱和趋势,其原因有两个: 一是由于 Si/SiO₂ 界面附近氧化物正电荷增多减弱了 SiO_2 层内的电场,即减小了电子-空穴对的分离几率,从而减少了空穴俘获量;其次是空穴俘获陷阱数目有限,正电荷不可能无限增多,到了一定剂量就会饱和. Fleet-Wood 等^[6]也曾报道过这一现象.

正偏下 ΔV_{ot} 在大剂量后出现饱和趋势,其原因有两个: 一是由于 Si/SiO₂ 界面附近氧化物正电荷增多减弱了 SiO_2 层内的电场,即减小了电子-空穴对的分离几率,从而减少了空穴俘获量;其次是空穴俘获陷阱数目有限,正电荷不可能无限增多,到了一定剂量就会饱和. Fleet-Wood 等^[6]也曾报道过这一现象.

图 3 给出了一定剂量下 ΔV_{ot} 与偏置电场的关系,这同 Schwank 等^[4]采用 MOS 电容所得的实验结果相似. 十分明显,栅偏置电场为 1 MV/cm 时, ΔV_{ot} 达最大,而栅偏置

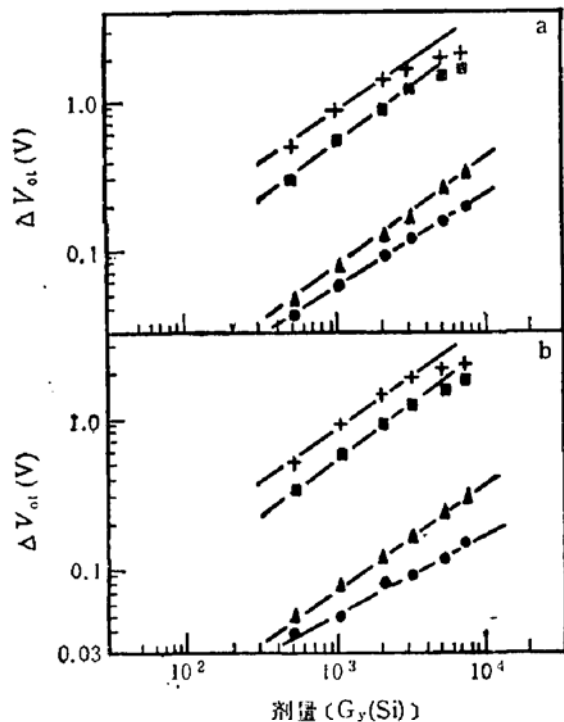


图 2 几组栅置电场下 MOS 管的 ΔV_{ot} 与总剂量 D 的关系

a) P 沟 $V_{ds} = 0V$ ■ 2.9 MV/cm + 1.1 MV/cm
 ▲ -2.9 MV/cm ● -1.8 MV/cm, b) N 沟
 $V_{ds} = 0V$ ■ 3.2 MV/cm + 1.1 MV/cm
 ▲ -1.8 MV/cm ● -0.36 MV/cm

继续增大时, ΔV_{ox} 却减少。这是由于大电场下衬底中电子进入 SiO_2 层并和俘获的空穴中和造成的^[4]。

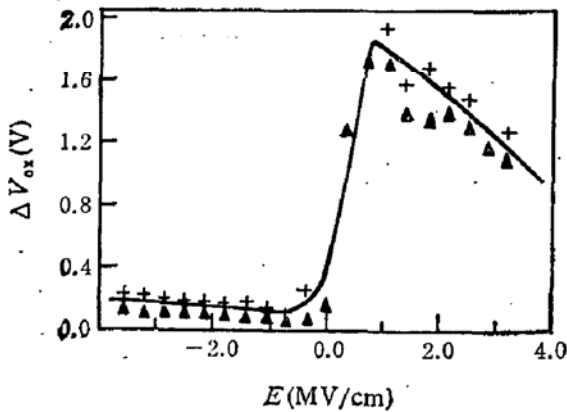


图3 总剂量为 3.0 kGy (Si) 时 ΔV_{ox} 与栅偏置电场的关系

▲ P沟 + N沟 $V_{ds} = 0V$

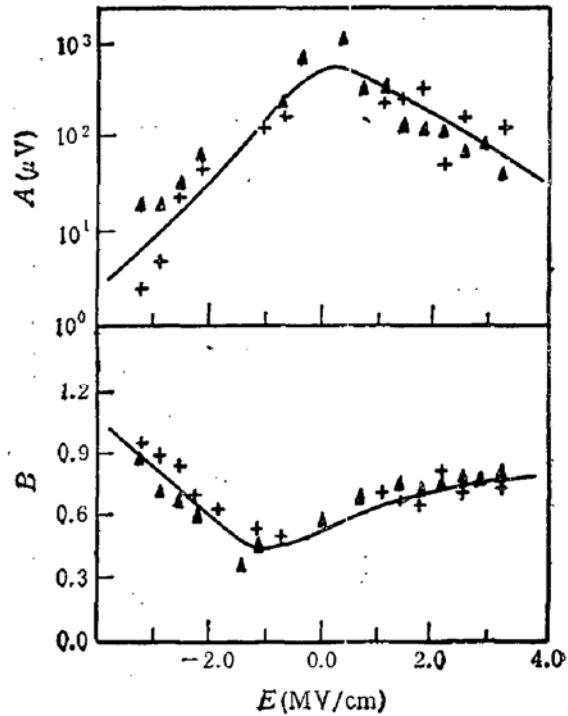


图4 拟合系数 A 和 B 与栅偏置电场的关系

▲ P沟 + N沟

我们还对 ΔV_{ox} 与剂量 D 进行指数曲线拟合, 即

$$\Delta V_{ox} = AD^B \quad (9)$$

图4 给出拟合系数 A 和 B 与栅偏置电场的关系。从图中可以看出, A 和 B 与管子的沟道种类无关, 这是由于二种沟道的晶体管都是同一种栅氧化工艺的缘故。

2. 漏源电压对 MOS 管辐照响应的影响

许多报道发现当 MOSFET 处于辐照环境中, 漏源电压增大会影响阈值电压漂移^[10,11]。如图5所示, 对几种不同漏源电压辐照后的N沟和P沟管进行了 $I-V$ 曲线测试。随着P沟管所加的漏源电压 V_{ds} 增大, $I-V$ 亚阈曲线的漂移和倾斜度增大, 这说明界面态和氧化物电荷有所增加。对N沟管也有相似现象, 但其变化相对较小。这种现象起因于漏源电压不同。当漏源之间加电压后, 栅氧化层局部区域内形成一个电场, 如图6所示, 这个非均匀电场导致在栅氧化层内辐照产生的氧化物正电荷和界面态有所改变。与图4相对应, P沟管漏源电压从零增加到 $-8V$, 相当于局域电场从0增加到 1 MV/cm 左右, 因此氧化物电荷增长随漏源电压增大而加快; N沟管漏源电压从 $0V$ 增加到 $8V$ 相当于电场从0增加到负 1 MV/cm 左右, 氧化物电荷则出现较少量增加。

3. 阈值电压漂移模型

早在建立 MOSFET 的 $I-V$ 方程中, 就考虑到了阈值电压受氧化物电荷和界面陷阱俘获电荷的影响。氧化物电荷对阈值电压的影响是整个栅氧化层中正电荷共同产生的, 距

Si/SiO₂ 界面越近,作用越大;界面态对阈电压的影响是由界面陷阱俘获电子或空穴产生,但是目前对起作用的界面态能级范围仍不是很明朗,Gaitan 等^[1]曾认为由平带到反型之间的界面态对阈电压有贡献。

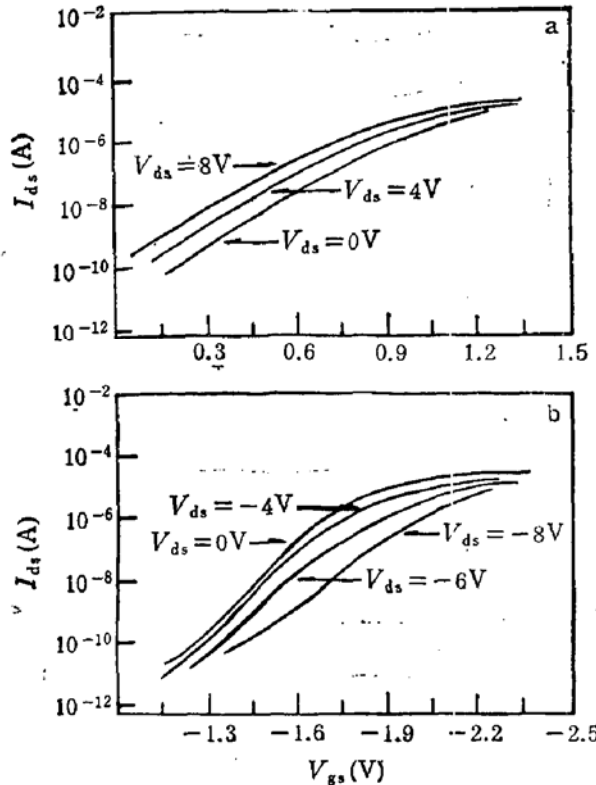


图5 不同漏源电压下辐照后 MOS 管的 I - V 特性曲线
a) N 沟 7×10^3 Gy (Si) $V_{gs} = 0$ V b) P 沟
 7×10^3 Gy (Si) $V_{gs} = 0$ V

假设能级范围为 ΔE_{th} 的界面态对阈电压有贡献,能级范围为 ΔE_{in} 的界面态为 ΔN_{it} (即半带到反型之间的界面态),应该有下列关系:

$$\Delta V_{th} = \Delta V_{ot} \pm \Delta E_{th} \cdot \Delta \bar{D}_{it}, \quad (10)$$

$$\Delta N_{it} = \Delta D_{it} \cdot \Delta E_{in}$$

$$= \frac{C_{ox}}{q} |\Delta V_{inv} - \Delta V_{mg}|.$$

(11)

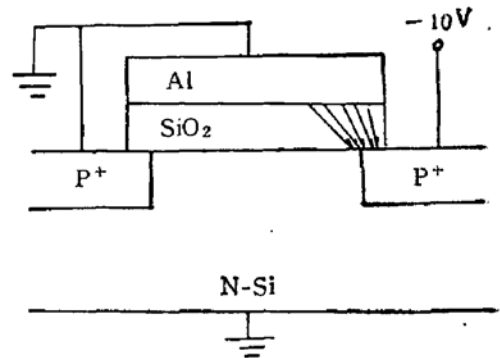


图6 漏源电压对氧化层的电场分布的影响

$\Delta \bar{D}_{it}$ 为电离辐照产生的平均界面态密度,当界面态均匀分布时,它等于用(5)式求得的辐照前后 D_{it} 之差。如图1所示, I - V 亚阈区几乎呈现直线,故可认为界面态分布均匀。对15组P沟管和24组N沟管的 ΔV_{th} , ΔV_{ot} , ΔN_{it} , ΔV_{inv} , ΔD_{it} 数据进行了统计计算,结果列于表1。计算所得均方误差都很小。两种沟道的 MOS 管的 ΔE_{in} 正好都等于 $q\phi_B$,证明了对反型点电压漂移贡献的界面态范围为 $q\phi_B$,即半带到反型点能级范围,这与理论相符,同时也说明了界面态分布均匀假设是合理的。从表1还得知,对阈电压漂移有贡献的界面态范围大于 $q\phi_B$, 大约为 $E_g/2$ (0.55eV) 左右。可见将管子的 ΔV_{th} 和电容的 ΔV_{inv} 等效起来并非很合理^[7,9]。

ESR 研究曾表明^[12],费米能级移动到禁带中央时,整个界面态是呈电中性,这是应用[7]式测量氧化物电荷对阈电压贡献的依据。McWhorter 等的研究结果表明^[13],电离辐

表1 MOS 管的 ΔE_{th} 、 ΔE_{in} 及均方误差 σ_{th} 、 σ_{in} (单位: eV)

	ΔE_{th}	σ_{th}	ΔE_{in}	σ_{in}	$q\phi_B$
P	0.62	0.03	0.37	0.03	0.37
N	0.51	0.04	0.29	0.02	0.29

照在禁带中感生的界面态可分为施主界面态和受主界面态,并可用电导法分离。本文实验结果说明,N沟道 MOS 管的阈电压应该受禁带上半部总界面态影响,P沟道 MOS 管则受禁带下半部总界面态影响。至于二种沟管所得 ΔE_{th} 与 $E_g/2$ 有少量偏差,很可能是由于在禁带二端界面态分布不均匀造成。

四、结 语

综上所述,实验得到以下几点结论:

(1) 辐照产生氧化物电荷对 ΔV_{th} 的贡献 ΔV_o 随辐照剂量 D 的变化关系可表达为 $\Delta V_o = -AD^B$, 其中 A 和 B 是与栅偏置电场有关的量,与沟道种类无关。在 1 MV/cm 栅偏电场辐照的情况下, ΔV_o 最大。当正偏辐照下剂量到 $5 \times 10^3\text{ Gy(Si)}$ 以后, ΔV_o 有饱和趋势。

(2) 漏源电压对 MOSFET 的辐照效应有影响,漏源电压会使辐照引起的 Si/SiO₂ 界面态和氧化物电荷增长加快,但这种效应对长沟管不太明显。

(3) 阈电压漂移可分为氧化物电荷和界面态二者的贡献,有影响的界面态能级范围约为 $E_g/2$,对 N 沟管为禁带上半部,对 P 沟管为禁带下半部。

以上对铝栅长沟 MOS 管进行了电离辐照响应研究,其中辐照引起的氧化物电荷增长的规律同硅栅电容的研究结果相同^[4]。但对于硅栅短沟 MOS 管,还会出现增强辐照效应^[14]。另外,上述计算方法适用于长沟 MOS 管^[1],对短沟 MOS 管需要修正。

北京半导体器件三厂倪秀珍等提供了实验样品,在此深表感谢。

参 考 文 献

- [1] M. Gaitan, *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-31, 1256(1984).
- [2] K. F. Galloway, *et al.*, *ibid*, 1497(1984).
- [3] T. H. Distefano *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 25, 685(1974).
- [4] J. R. Schwank, *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-33, 1178(1986).
- [5] M. Knoll, *et al.*, *ibid*, NS-29, 1471(1982).
- [6] D. M. Fleetwood, *et al.*, *ibid*, NS-34, 1178(1987).
- [7] J. M. Benedetto, *et al.*, *ibid*, NS-31, 1461(1984).
- [8] N. D. Arora, *et al.*, *IEEE Trans. Electron. Devices*, ED-34(1), 89(1987).
- [9] P. S. Winoker *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-31, 1453(1984).
- [10] T. R. Oldham *et al.*, *ibid*, NS-31, 1236(1984).
- [11] S. S. Seehra *et al.*, *ibid*, NS-29, 1559(1982).
- [12] P. M. Lenahan *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 54(3), 1457(1983).
- [13] P. J. McWhorter *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-35, 1154(1988).
- [14] F. Wang *et al.*, *Proc. ICSICT'86*, Beijing, China, 1986, p. 520.

Ionizing Radiation Effects of MOSFETs

Gao Wenyu, Yan Rongliang, Yu Xuefeng, Ren Diyuan and Fan Long

(Xinjiang Institute of Physics, Academia Sinica, Urumqi, 830031)

Abstract

Ionizing radiation effects of MOSFETs have been studied. The empirical relationship of the threshold voltage shift caused by radiation induced oxide-trapped charges with irradiation dose and gate bias is given. The results show that the oxide-trapped charges induced by irradiation are not dependent on the channel type of MOSFET, and drain-source voltage is a factor of affecting the irradiation response. In addition, the statistical data show that irradiation induced interface states within energy level of $E_s/2$ contribute to the threshold voltage shift. The experimental results are discussed as well.

EEACC: 2560R, 2530F