

# MOS 结构热载子注入与总剂量辐照响应的相关性

余学峰 任迪远 艾尔肯 张国强 陆 妩 郭 旗

(中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 通过对 MOS 电容进行热载子注入和总剂量辐照实验,探讨了 MOS 结构热载子注入与总剂量辐照响应的相关性. 研究表明,热载子注入和总剂量辐射都会引起 MOS 结构的损伤,但前者产生的损伤是由于热电子注入在 MOS 结构的 Si/SiO<sub>2</sub> 系统引入氧化物负电荷引起的,后者产生的损伤是由于电离辐射在 MOS 结构的 Si/SiO<sub>2</sub> 系统感生氧化物正电荷和界面态而导致的. 进一步的研究表明,针对总剂量辐射损伤采用的加固工艺,能对热电子注入感生氧化物负电荷起到非常有效的抑制作用.

**关键词:** 热载子注入; 总剂量辐照; 相关性

EEACC: 2570D

中图分类号: TN386.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)10-1975-04

## 1 引言

大量的研究表明,热载子注入及总剂量辐照都将引起 MOS 结构或器件的损伤<sup>[1-7]</sup>,两种损伤从本质上说都是通过由热载子注入或总剂量辐照向器件的 Si/SiO<sub>2</sub> 系统引入了氧化物固定正(或负)电荷及界面态,在 SiO<sub>2</sub> 层内形成了静电荷的积累,引起器件电参数退化,从而导致电路性能下降甚至失效. 两者的区别在于,热载子注入引入的氧化物电荷和界面态主要是由热电子在 Si/SiO<sub>2</sub> 界面及 SiO<sub>2</sub> 层内的碰撞和能量转移完成的,而后者则是通过在 SiO<sub>2</sub> 内电离产生电子-空穴对引入的. 由此引发疑问:在损伤机理相似、产生方式不同的情况下,两种损伤在器件电参数上的具体表现形式上有哪些相同或相异之处. 进而引发:一些 MOS 器件经过总剂量辐射加固工艺和技术,是否能够同样起到有效抑制热载子损伤的作用. 这些问题的回答,对于我们将目前一些比较成熟的抗辐射加固技术移植于热载子损伤的加固抑制,从而把两项困难的加固工作合二为一,以及使用比较经济、快速的总剂量辐照方法来预测需花费大量时间的热载子损伤效应等,具有十分重要的意义.

本文对两种具有不同总剂量加固水平的 MOS

电容进行了热载子注入和电离辐照实验,对同一工艺制作的 MOS 电容对热载子注入和总剂量辐照的响应特性进行了比较,并探讨了针对总剂量辐照损伤采取的加固工艺对抑制热载子损伤方面所起的作用.

## 2 实验

实验样品为在国内某工艺线上用总剂量加固工艺(1#)和常规工艺(2#)生产的 n 型 MOS 电容,两种样品的衬底都为 n 100 6~9  $\mu\text{m}$  的圆形硅片,栅氧化层厚度约为 60nm,铝层厚度为 1.2~1.4 $\mu\text{m}$ ,电容栅面积为 400 $\mu\text{m}$  × 400 $\mu\text{m}$ . 2# 样品的栅氧化气氛为 O<sub>2</sub> + CH<sub>3</sub>Cl<sub>3</sub>, 1# 为纯干 O<sub>2</sub>. 每个芯片上各有四个 nMOS 电容,用双列直插式管壳和柯伐合金封装.

对两种样品从 Al/SiO<sub>2</sub> 界面进行热电子注入(gate hot-electron injection, GHI)时,栅极与衬底间的电压均为 -25V;从衬底进行热电子注入(substrate hot-electron injection, SHI)时,栅极与衬底间的电压均为 25V. 总剂量辐照时,两种样品栅、衬底间偏置电压分别为 0V 和 -5V 两种,辐照剂量率为 1.67 Gy(Si)/s.

在预定的热电子注入累积时间及总剂量下,测量样品在 1MHz 高频下的 C-V 曲线,从高频 C-V 曲

余学峰 男,副研究员,从事电子元器件辐射损伤效应和抗辐射加固研究.

2005-02-08 收到,2005-06-01 定稿

线可获得当 Si 表面势分别为  $0, \phi_b, 2\phi_b$  时所对应的平带电压  $V_{FB}$ , 中带电压  $V_{mg}$  和反型电压  $V_{inv}$ . 根据“Stretch out”分离技术<sup>[8,9]</sup>, 可得到热载子注入感生氧化物电荷密度  $N_{ot}$ 、中带到强反型区的平均界面态密度  $N_{it}$  分别为:

$$N_{ot} = (C_{ox}/q) V_{mg}$$

$$N_{it} = (C_{ox}/q) / (V_{inv} - V_{mg})$$

### 3 结果及讨论

#### 3.1 MOS 结构热载子注入损伤与电离辐照损伤特性的比较

图 1 为常规工艺(2#)制作的样品分别在 Al 栅热电子注入(GHI)和总剂量辐照中, 高频  $C-V$  特性曲线分别随注入累积时间和辐照累积剂量的变化趋势. 从图 1 可以看到, 在热载子注入条件下, 样品的高频  $C-V$  曲线随注入累积时间的增加而正向漂移; 在总剂量辐照条件下, 样品的高频  $C-V$  曲线随辐照累积剂量的增加而负向漂移. 这表明虽然热电子注入和电离辐照都在样品的  $SiO_2$  层建立并积累了净电荷, 但所带极性相反, 前者为负电荷, 后者为正电荷.

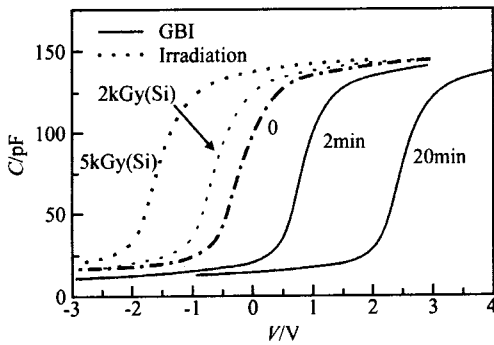


图 1 常规工艺 MOS 结构的高频  $C-V$  特性曲线分别随注入累积时间和辐照累积剂量的变化趋势 辐照偏置为  $V_{gs} = -5V$ , 热电子注入电压为  $V_{gs} = -25V$ .

Fig.1 Changes of the  $C-V$  curve versus the time of hot-carrier injection and the total dose of irradiation respectively Bias during irradiation is  $-5V$ , and during hot-carrier injection is  $-25V$ .

为了从氧化物电荷和界面态产生的角度对 MOS 结构的热电子注入损伤和总剂量辐照损伤进行比较, 我们进行了如图 2 和 3 所示的试验. 图 2 为常规工艺制作的样品在辐照偏置分别为  $V_{gs} = 0V$

和  $V_{gs} = -5V$  条件下, 氧化物正电荷及界面态密度变化随辐照总剂量的关系. 图 3 为热电子分别从栅极和衬底注入条件下, 常规工艺样品感生平均氧化物负电荷密度和界面态密度随注入时间的变化. 比较图 2 和 3, 可以看到, MOS 结构热电子注入和总剂量辐照损伤的两点明显区别: (1) 无论在何种热电子注入方向或辐照偏置下, 热载子注入产生的氧化物电荷都带负电, 而总剂量辐照产生的带正电; (2) 在热载子两种方向注入下, MOS 结构的界面态密度基本不随注入时间的增加发生改变; 而两种辐照偏置下, 界面态密度都随辐照累积剂量的增加有所增加, 特别是在  $V_{gs} = 0V$  偏置下, 增加幅度更大.

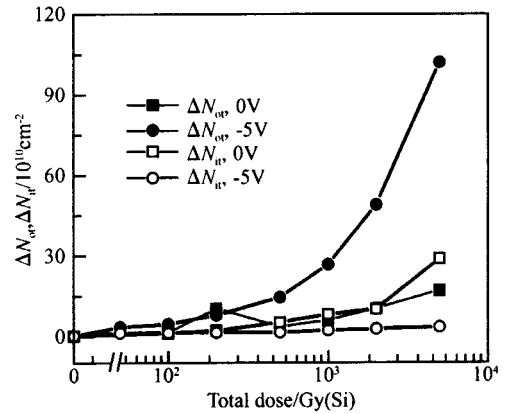


图 2 常规工艺样品在不同辐照偏置下, 氧化物正电荷及界面态密度变化随辐照总剂量的关系

Fig. 2 Changes of the oxide charges and interface states of conventional MOS structures versus the total dose of radiation in different radiation biases

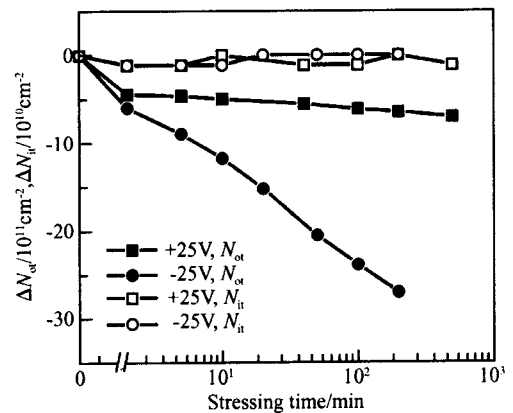


图 3 热电子从不同路径注入条件下, 常规工艺样品感生平均氧化物负电荷密度和界面态密度随注入时间的变化

Fig. 3 Changes of the oxide charges and interface states of conventional MOS structures versus the time of hot-carrier injection with different injecting routes

简单分析认为, MOS 结构在热电子注入情况下,一方面 SiO<sub>2</sub> 层相对存在大量注入电子,另一方面由于 SiO<sub>2</sub> 层内的电子空穴电离约需 9eV 的能量,因此由注入的热电子碰撞而电离产生电子-空穴对的几率很小,两方面因素造成了热电子注入在 SiO<sub>2</sub> 层内产生的中性缺陷俘获电子的几率大大超过俘获空穴的几率,由此造成了热电子注入条件下, SiO<sub>2</sub> 层内氧化物负电荷的建立和积累. 与此相对应,总剂量辐照在 MOS 结构的 SiO<sub>2</sub> 层电离产生了大量的电子-空穴对,在偏置电场作用下,电子与空穴分离,使得位于 Si/ SiO<sub>2</sub> 界面附近的氧化物陷阱容易俘获空穴,由此形成了氧化物正电荷. 虽然电子碰撞也可在 MOS 结构 Si/ SiO<sub>2</sub> 界面产生界面态,但由于电子碰撞产生界面态的几率远小于空穴<sup>[10~12]</sup>,因此出于同样原因,同氧化物负电荷比较,由热电子注入产生的界面态相对较少.

### 3.2 总剂量辐射加固工艺对热电子注入损伤的抑制作用

图 4 为采用总剂量加固工艺(1#)制作的样品和一般常规工艺(2#)制作的样品,在辐照偏置分别为  $V_{gs} = 0V$  和  $V_{gs} = -5V$  条件下,平带电压随总剂量的变化. 从图 4 可以观察到,在偏置为  $V_{gs} = -5V$  的条件下,两种样品的平带电压都随辐照累积剂量的增加而负向漂移,但 2# 样品的漂移幅度远大于 1# 样品. 在辐照累积剂量为 5k Gy (Si) 时,1# 样品的平带电压负向漂移量为 0.3V,而此时 2# 样品的漂

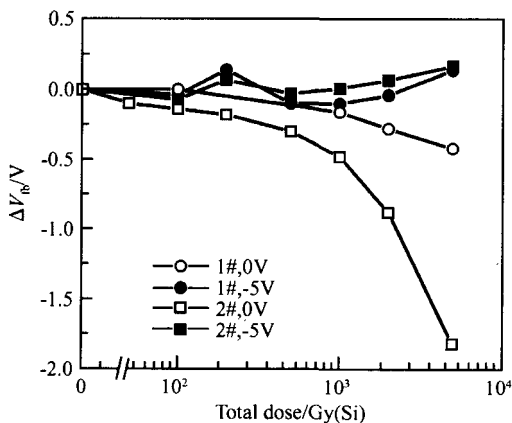


图 4 总剂量加固工艺(1#)和常规工艺(2#)制作的样品,在不同辐照偏置条件下,平带电压随总剂量的变化

Fig. 4 Flat band voltages of conventional and hardened MOS structures versus the total dose of radiation in different radiation biases

移量已达 1.8V. 在  $V_{gs} = 0V$  辐照偏置下,两种样品的平带电压都小幅正漂. 虽然该偏置条件下,两种样品平带电压的漂移幅度都很小,但仍表现出 2# 样品大于 1# 样品的现象.

图 5 与图 4 相对应,为 1# 和 2# 样品在热电子分别从栅极和衬底注入条件下,平带电压随注入偏置时间的变化. 从图 5 可以看到,在两种路径的热电子注入下,2# 样品的平带电压都正向漂移,其中热电子从栅极注入的平带电压正向漂移幅度,在注入累积时间为 100min 时,已达到约 4V. 与此相对照,1# 样品的平带电压,无论在何种方向的热电子注入下,都没有出现明显的漂移.

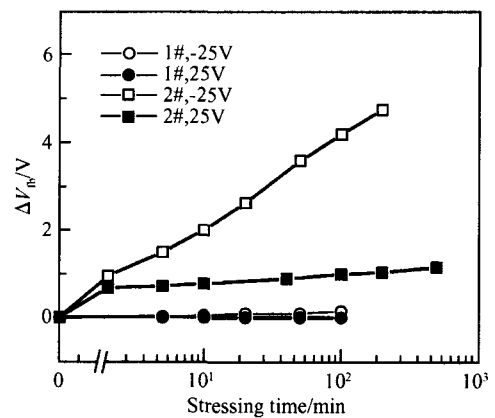


图 5 总剂量加固工艺(1#)和常规工艺(2#)制作的样品,热电子从不同路径注入条件下,平带电压随总剂量的变化

Fig. 5 Flat band voltages of conventional and hardened MOS structures versus the time of hot-carrier injection with different injecting routes

图 4 和图 5 的试验结果表明,针对总剂量辐照损伤采取的加固工艺,不但能有效地抑制电离辐射环境中 MOS 结构 Si/ SiO<sub>2</sub> 系统中氧化正电荷和界面态的产生,而且能对 MOS 结构在热电子注入情况下氧化物负电荷的感生起到非常有效的抑制作用. 这一试验结果也从另一面说明,工艺制作过程与 MOS 结构 Si/ SiO<sub>2</sub> 系统引入的正电荷俘获中心和负电荷俘获中心有强烈的正相关性,如果通过工艺过程能够对其中一种的存在和产生进行抑制,则另一种的存在和产生也可得到有效控制.

## 4 结论

对同一工艺制作的 MOS 电容样品,热电子注入引起了其高频 C-V 特性曲线的正向漂移,而总剂

量辐照引起了  $C-V$  曲线的负向漂移. 进一步研究结果表明, MOS 结构的热载子损伤是由于热电子注入在 MOS 结构的 Si/ SiO<sub>2</sub> 系统引入氧化物负电荷引起的; 而总剂量辐射损伤是由于电离辐射在 MOS 结构的 Si/ SiO<sub>2</sub> 系统感生氧化物正电荷和界面态而导致的.

实验结果还证明, 工艺制作过程与 MOS 结构 Si/ SiO<sub>2</sub> 系统引入的正电荷俘获中心和负电荷俘获中心有强烈的正相关性. 针对总剂量辐射损伤采用的加固工艺, 不但能有效地抑制 MOS 结构 Si/ SiO<sub>2</sub> 系统在电离辐射环境中氧化正电荷和界面态的产生, 而且能对热电子注入感生氧化物负电荷起到非常有效的抑制作用.

### 参考文献

- [ 1 ] Dimaria D J , Arnold D , Carter E. Impact ionization and positive charge formation in silicon dioxide films on silicon. Appl Phys Lett ,1992 ,60(17) :2118
- [ 2 ] Chung J E , Ko P K , Hu C M. A model for hot-electron-induced MOSFET linear-current degradation based on mobility reduction due to interface-state generation. IEEE Trans Electron Devices ,1991 ,38(6) :1362
- [ 3 ] Hu C M , Tam S , Hsu F C , et al. Hot-electron-induced MOSFET degradation-model, monitor, and improvement. IEEE Trans Electron Devices ,1985 ,32:375
- [ 4 ] Buchanan D A. Polarity dependence of hot-electron-induced trap creation in metal-oxide-semiconductor capacitors. Appl Phys Lett ,1992 ,60(2) :216
- [ 5 ] Warren W L , Lenahan P M. A comparison of positive charge generation in high field stressing and ionizing radiation on MOS structures. IEEE Trans Nucl Sci ,1987 ,34(6) :1355
- [ 6 ] McBrayer J D , Fleetwood D M , Pastorek R A , et al. Correlation of hot-carrier and radiation effects in MOS transistors. IEEE Trans Nucl Sci ,1985 ,32(6) :3935
- [ 7 ] Huang D H , King E E , Wang J J , et al. Correlation between channel hot-electron degradation and radiation-induced interface trapping in N-channel LDD devices. IEEE Trans Nucl Sci ,1991 ,38(6) :1336
- [ 8 ] Winokur P S , Schwank J R , McWhorter P J. Correlating the radiation response of MOS capacitors and transistors. IEEE Trans Nucl Sci ,1984 ,31(6) :1453
- [ 9 ] Boesh H E Jr. Interface-state generation in thick SiO<sub>2</sub> layers. IEEE Trans Nucl Sci ,1982 ,29(6) :1446
- [10] Sah C T. Origin of interface states and oxide charges generated by ionizing radiation. IEEE Trans Nucl Sci ,1976 ,23(6) :1563
- [11] Mclean F B. A framework for understanding radiation-induced interface states in SiO<sub>2</sub> MOS structures. IEEE Trans Nucl Sci ,1980 ,27(6) :1651
- [12] Winokur P S , Boesch H E Jr , McGarrity J M , et al. Two-stage process for buildup of radiation-induced interface states. J Appl Phys ,1979 ;50(5) :3492

## Correlations Between MOS Structures' Responses to Hot-Carrier Injection and Total Dose Radiation

Yu Xuefeng , Ren Diyuan , Erken , Zhang Guoqiang , Lu Wu , and Guo Qi

( Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry , Chinese Academy of Sciences , Urumqi 830011 , China )

**Abstract :** By comparing the MOS structure's responses to hot-carrier injection and total dose radiation ,the correlation between them is investigated. It is shown that both hot-carrier injection and total dose radiation can cause damage on MOS structures ,but what hot-carrier injection brings in MOS structures are negative oxide charges ,while total dose radiation brings positive oxide charges and interface states. Further investigation indicates that the total dose radiation hardening process can also restrain the generation of negative oxide charges induced by hot-carrier injection.

**Key words :** hot-carrier injection ; total dose radiation ; correlation

EEACC : 2570D

Article ID : 0253-4177(2005)10-1975-04