

总剂量辐照对热载流子效应的影响研究

何玉娟 章晓文 刘远

Total dose dependence of hot carrier injection effect in the n-channel metal oxide semiconductor devices

He Yu-Juan Zhang Xiao-Wen Liu Yuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 246101 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.246101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.246101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I24>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

总剂量效应致 0.13 $\mu\text{m}$  部分耗尽绝缘体上硅 N 型金属氧化物半导体场效应晶体管热载流子增强效应

Enhanced channel hot carrier effect of 0.13  $\mu\text{m}$  silicon-on-insulator N metal-oxide-semiconductor field-effect transistor induced by total ionizing dose effect

物理学报.2016, 65(9): 096104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.096104>

超深亚微米互补金属氧化物半导体器件的剂量率效应

Dose-rate sensitivity of deep sub-micro complementary metal oxide semiconductor process

物理学报.2016, 65(7): 076102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.076102>

电离辐射环境下的部分耗尽绝缘体上硅 n 型金属氧化物半导体场效应晶体管可靠性研究

Reliability of partially-depleted silicon-on-insulator n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor under the ionizing radiation environment

物理学报.2015, 64(8): 086101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.086101>

深亚微米金属氧化物场效应晶体管及寄生双极晶体管的总剂量效应研究

Radiation effect of deep-submicron metal-oxide-semiconductor field-effect transistor and parasitic transistor

物理学报.2014, 63(22): 226101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.226101>

静态随机存储器总剂量辐射损伤的在线与离线测试方法

Online and offline test method of total dose radiation damage on static random access memory

物理学报.2014, 63(8): 086101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.086101>

## 总剂量辐照对热载流子效应的影响研究\*

何玉娟<sup>†</sup> 章晓文 刘远

(工业和信息化部电子第五研究所, 电子元器件可靠性物理及其应用技术国家重点实验室, 广州 510610)

(2016年7月11日收到; 2016年8月29日收到修改稿)

研究了总剂量辐照效应对  $0.35\ \mu\text{m}$  n型金属-氧化物-半导体 (NMOS) 器件热载流子测试的影响. 试验结果表明: 经过  $100\ \text{krad}(\text{Si})$  总剂量辐照后进行  $5000\ \text{s}$  的热载流子测试, NMOS 器件阈值电压随着总剂量的增大而减小, 然后随热载流子测试时间的增加而增大, 且变化值远远超过未经过总剂量辐照的器件; 总剂量辐照后经过  $200\ \text{h}$  高温退火, 再进行  $5000\ \text{s}$  的热载流子测试, 其热载流子退化值远小于未高温退火的样品, 但比未辐照的样品更明显, 即总剂量辐照与热载流子的协同效应要超过两种效应的简单叠加. 根据两种效应的原理分析, 认为总剂量辐照感生氧化层陷阱电荷中的空穴与热电子复合减少了正氧化层的陷阱电荷, 但辐照感生界面态俘获热电子形成负的界面陷阱电荷, 表现为两者的协同效应模拟方式比单机理模拟方式对器件的影响更严重.

**关键词:** 总剂量辐照, 热载流子效应, 协同效应**PACS:** 61.80.Ed, 61.80.Jh, 73.40.Qv**DOI:** 10.7498/aps.65.246101

## 1 引言

在空间长时间运行的设备和器件, 在受到空间辐射效应影响的同时, 也会由于热载流子注入 (hot carrier injection, HCI) 效应、与时间有关的介质击穿 (time-dependent dielectric breakdown) 效应等的影响而使得器件寿命降低. 国内外无论是器件可靠性还是空间效应的模拟试验, 都是采用单机理的地面模拟方式, 且国内外对总剂量辐照效应<sup>[1,2]</sup>和热载流子效应<sup>[3,4]</sup>的机理研究得较为深入, 也针对这两种效应进行过对比研究<sup>[5,6]</sup>, 认为总剂量效应与热载流子效应损伤机理相似, 都会产生氧化层陷阱电荷和界面陷阱电荷, 但损伤表现形式不同: 总剂量效应在深亚微米 n型金属-氧化物-半导体 (NMOS) 器件栅氧层和场氧层中都会产生氧化层陷阱电荷和界面陷阱电荷, 使得阈值电压漂移, 泄漏电流增大; 但热载流子效应则主要影响

器件栅氧和  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  界面, 产生氧化层陷阱电荷和界面陷阱电荷, 使得阈值电压增大, 跨导降低.

国内外对于空间辐照与电应力可靠性综合效应的机理模型以及试验方法的研究极少见, 但空间应用的设备和元器件却同时受到空间辐照效应及电应力可靠性效应等综合效应的影响, 空间总剂量辐照对器件和电路的电可靠性影响究竟有多大, 其结果和机理仍在探索中. 文献<sup>[7]</sup>初步探索了金属-氧化物-半导体 (MOS) 电容的总剂量辐射与热载流子叠加损伤, 认为两者协同效应损伤并不是简单的线性叠加, 但对其原因和机理并未进行分析.

本文针对  $0.35\ \mu\text{m}$  特征尺寸的 NMOS 器件, 研究总剂量辐照效应对 NMOS 器件热载流子测试的影响, 发现在经过总剂量辐照后进行热载流子测试, 阈值电压随着总剂量的增大而减小, 然后随着热载流子测试时间的增大而增大, 且变化值远远超过未经过总剂量辐照的器件, 即总剂量辐照与热载流子的协同效应要超过两种效应的简单叠加.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61574048, 61204112) 和广东省科技重大专项 (批准号: 2015B090912002) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [heyu0000@126.com](mailto:heyu0000@126.com)

## 2 试 验

试验所用的器件为SMIC公司流片的0.35 μm特征尺寸的NMOS器件, 栅氧化层厚度为6.5 nm, 宽长比 $W/L$ 为50. 试验样品3只, 编号为1#, 2#和3#. 具体试验条件见表1.

总剂量辐照试验所用试验剂量率为50 rad(Si)/s, 偏置为ON偏置(栅极电压 $V_G =$

$V_{DD} = 3.3$  V, 漏极电压、源极电压和体区电压为 $V_D = V_S = V_B = 0$  V), 试验在中国科学院新疆理化技术研究所的钴-60总剂量辐射源进行. 总剂量辐照后进行高温(100 °C)下ON偏置的退火试验, 退火时间为200 h.

热载流子测试采用的试验条件为 $V_D = 4.0$  V,  $V_G = 1.6$  V,  $V_S = V_B = 0$  V, 测试时间为10000 s, 采用Keithley 4200半导体参数测试系统进行NMOS器件的 $I-V$ 测试.

表1 3只试验样品的试验条件  
Table 1. The test conditions of three samples.

编号	总剂量辐照条件	辐照后退火条件	热载流子测试条件
1#	总剂量 100 krad(Si)	未退火	$V_D = 4.0$ V, $V_G = 1.6$ V,
2#	总剂量 300 krad(Si)	高温退火 200 h	$V_S = V_B = 0$ V,
3#	未辐照	未退火	热载流子测试时间 5000 s

## 3 试验结果

NMOS器件1#总剂量辐照前后以及热载流子试验前后的漏极电流与栅极电压( $I_D-V_G$ )曲线和跨导与栅极电压( $G_m-V_G$ )曲线如图1所示. 从图1可以看出, NMOS器件在经过100 krad(Si)总剂量辐照后,  $I_D-V_G$ 曲线向负向漂移, 最大跨导 $G_{m(MAX)}$ 减小. 在总剂量辐照后, 对NMOS器件经过了10000 s的热载流子试验, 热载流子试验使得NMOS器件的 $I_D-V_G$ 曲线向正向漂移, 这与总剂量辐照结果相反, 同时热载流子试验使得NMOS器件的最大跨导 $G_{m(MAX)}$ 减小.

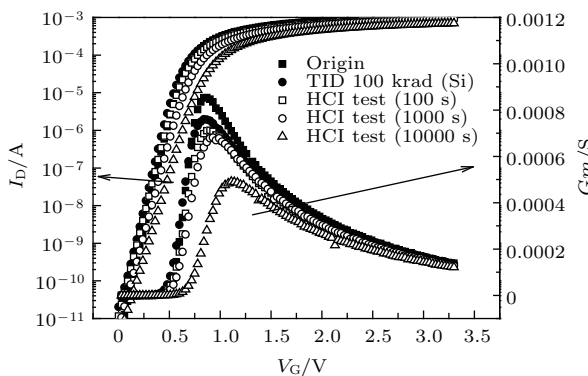


图1 1# 样品辐照后热载流子试验的 $I_D-V_G$ 和 $G_m-V_G$ 曲线

Fig. 1. The  $I_D-V_G$  and  $G_m-V_G$  curves of HCI test after TID test for 1# sample.

对于NMOS器件的阈值电压 $V_{th}$ 而言, 总剂量辐照与热载流子试验使得 $V_{th}$ 先减小、再增大, 是互相部分抵消的结果; 对于最大跨导 $G_{m(MAX)}$ 而言, 总剂量辐照与热载流子试验使得 $G_{m(MAX)}$ 一直减小, 是互相叠加的结果.

NMOS器件2#经过300 krad(Si)总剂量辐照以及退火试验后 $I_D-V_G$ 曲线如图2所示. 从图2可以看出, 退火试验使得器件由总剂量辐照引起的阈值电压漂移减小, 泄漏电流从辐照后的 $1 \times 10^{-5}$  A降低到 $1 \times 10^{-6}$  A. 2# 器件总剂量辐照以及退火试验后的热载流子测试曲线如图3所示. 从图3可以看出, 随着热载流子测试时间的增加, NMOS器件阈值电压向正向稍有增加, 截止态时的泄漏电流

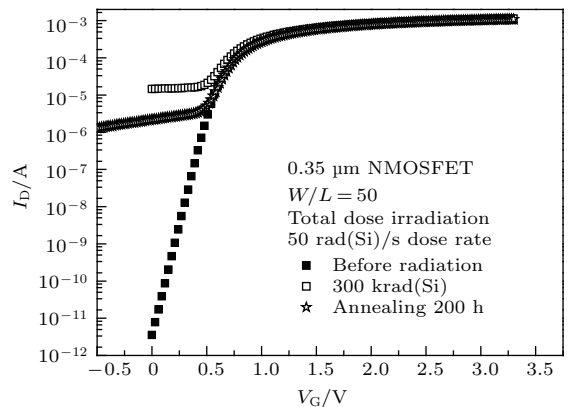


图2 2# 样品总剂量辐照以及退火试验前后 $I_D-V_G$ 曲线

Fig. 2. The  $I_D-V_G$  curves of TID irradiation and annealing test for 2# sample.

从 $1 \times 10^{-6}$  A 降低至 $1 \times 10^{-11}$  A, 与器件未辐照时状态一致. 而2# 器件热载流子测试的跨导随着热载流子测试时间的增加而略有降低, 降低幅度远小于1# 器件.

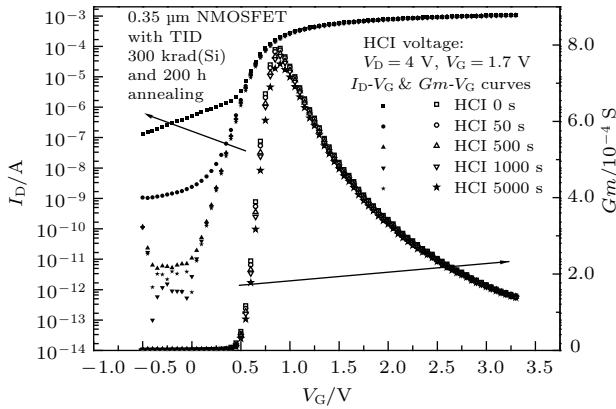


图3 2# 样品热载流子试验的  $I_D$ - $V_G$  和  $G_m$ - $V_G$  曲线  
Fig. 3. The  $I_D$ - $V_G$  and  $G_m$ - $V_G$  curves of HCl test for 2# sample.

NMOS 器件3# 未进行辐照, 其热载流子测试曲线如图4所示. 从图4可以看出, 随着热载流子测试时间的增加, NMOS 器件阈值电压以及跨导值随着热载流子测试时间的增加而基本不变.

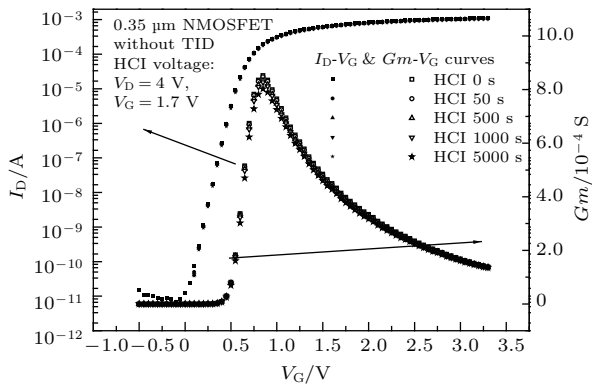


图4 3# 样品热载流子试验的  $I_D$ - $V_G$  和  $G_m$ - $V_G$  曲线  
Fig. 4. The  $I_D$ - $V_G$  and  $G_m$ - $V_G$  curves of HCl test for 3# sample.

#### 4 分析与讨论

0.35  $\mu\text{m}$  NMOS 器件经过总剂量辐照后热载流子测试前后  $V_{th}$  的变化与未经过辐照的同样品在相同热载流子测试电压下  $V_{th}$  的变化对比结果如图5所示. 从图5可以看出, 在热载流子测试时, 未经过辐照的3# 样品  $V_{th}$  的变化极小, 在经过5000 s 热载流子测试后,  $V_{th}$  只增加了0.005 V, 相比于

初始的  $V_{th}$ (0.55 V), 变化比例不超过1%. 而经过100 krad(Si) 总剂量辐照的1# 样品, 总剂量辐照到100 krad(Si) 时  $V_{th}$  负向漂移了0.028 V, 器件热载流子测试时  $V_{th}$  变化很大, 在经过5000 s 热载流子测试后, 阈值电压增加了0.15 V, 相比于初始阈值电压0.58 V, 变化比例超过25%. 经过300 krad(Si) 总剂量辐照以及200 h 退火试验后的2# 样品, 总剂量辐照达到300 krad(Si) 时  $V_{th}$  负向漂移了0.04 V, 总剂量退火试验后器件  $V_{th}$  又正向漂移了0.038 V,  $V_{th}$  基本恢复到未辐照时的水平. 2# 样品在热载流子测试时  $V_{th}$  变化不大, 在经过5000 s 热载流子测试后,  $V_{th}$  增加了0.018 V, 相比于初始  $V_{th}$ (0.56 V), 变化比例约为3.2%.

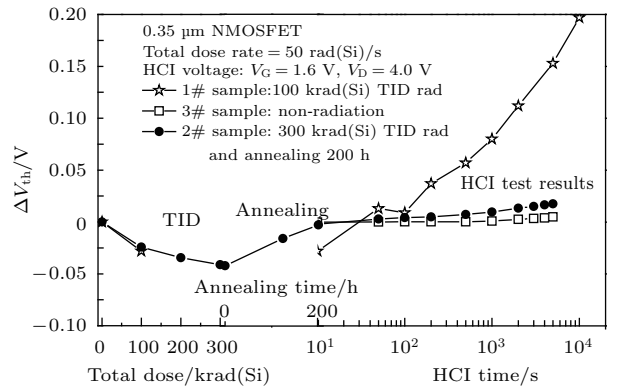


图5 经过总剂量辐照后的样品与未辐照样品的热载流子测试  $V_{th}$  变化曲线  
Fig. 5. The values of  $V_{th}$  versus times during TID, annealing and HCl test in three samples.

从图5可以看出, 只经过总剂量辐照未进行退火的1# 样品热载流子退化最大, 远超过其他2个样品; 2# 样品辐照后的退火试验, 使得其  $V_{th}$  与辐照前的  $V_{th}$  只相差0.002 V, 基本恢复到未辐照时的水平, 但2# 样品和3# 样品热载流子退化结果仍然相差很明显.

对于1# 样品而言, 在热载流子试验中  $V_{th}$  的变化相比于2# 和3# 样品非常明显, 其原因可能与总剂量退火效应以及总剂量和热载流子协同效应有关.

首先, 100 krad(Si) 总剂量辐照后, 对NMOS 器件进行热载流子试验, 由于总剂量辐照后未进行退火试验, 且进行热载流子试验时对NMOS 器件栅极和漏极施加电信号, 因此热载流子试验时, 是对器件同时进行总剂量退火以及热载流子测试.

常温下的总剂量退火效应曲线如图6所示, 采用电荷分离方法<sup>[8,9]</sup> 进行氧化层陷阱电荷和界面陷



阱电荷分离。常温加偏置总剂量退火效应会使得NMOS器件的氧化层陷阱电荷内的正电荷与电子复合,从而使得辐射感生的氧化层陷阱电荷减少;但常温下NMOS器件的界面态电荷退火效应较弱,且部分慢界面态在总剂量辐照后仍在慢慢建立<sup>[10]</sup>,因此常温加偏置退火会使得NMOS器件的界面态仍存在少量增长,在50 rad(Si)/s的高剂量率下的100 krad(Si)总剂量辐照,使NMOS器件的界面处的界面态增加较少,退火后界面态仍在缓慢增加,但增加的极少。

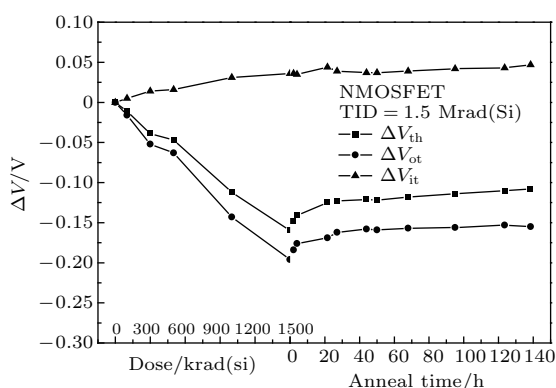


图6 NMOS器件在常温ON偏置下辐照与退火前后 $V_{th}$ 的变化

Fig. 6. The values of  $V_{th}$  versus times during TID and annealing test in NMOS with ON bias.

然而即使总剂量退火效应,也只是使得NMOS器件的氧化层陷阱电荷部分复合,且界面态增加较少,因此总剂量退火后NMOS器件的阈值电压正向增加的数值要小于其总剂量辐照导致的阈值电压负向漂移的数值,即总剂量退火后NMOS器件阈值电压无法恢复到未辐照的情况。

而从图5可以看出,NMOS器件的阈值电压从未辐照时的0.586 V,到辐照后的0.524 V,阈值电压漂移了-0.06 V,但10000 s热载流子试验后,阈值电压变化到0.791 V,相比于热载流子试验前阈值电压增大了0.26 V,相比于辐照前阈值电压增大了0.2 V.可见对于NMOS器件总剂量辐照后的热载流子效应,器件阈值电压变化是比只进行热载流子试验或只进行总剂量辐射试验时的阈值电压变化大很多.由此可见,总剂量辐照和热载流子的协同效应,比单一效应时的参数变化更加明显。

1#样品总剂量和热载流子试验前后由氧化层陷阱电荷和界面态电荷引起的阈值电压变化情况如图7所示.从图7可以看出,热载流子试验时,

NMOS器件的氧化层陷阱电荷缓慢增加,这是由于氧化层陷阱中的空穴电荷被热电子复合而导致的;但界面态增加得很快,总剂量辐照导致界面态的增加而引起阈值电压变化值为0.03 V,但10000 s热载流子试验却使得界面态导致的阈值电压变化值达到0.2 V,可见阈值电压正向漂移值基本上都是由界面态的增加而导致的。

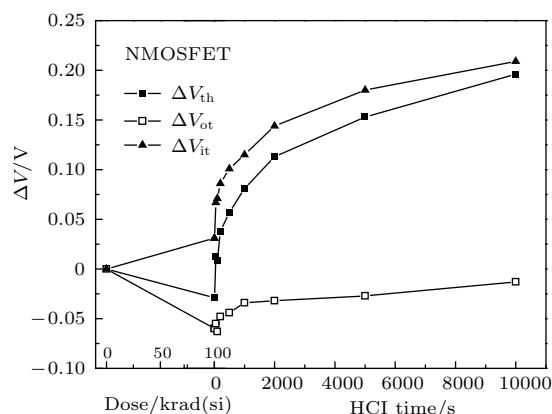


图7 辐照与热载流子试验中1#样品氧化层陷阱电荷与界面态电荷的变化导致的阈值电压变化

Fig. 7. The value of  $\Delta V_{th}$ ,  $\Delta V_{ot}$  and  $\Delta V_{it}$  versus times during TID and annealing test for 1# sample.

总剂量辐照和热载流子的协同效应使得器件参数变化更加明显,其原因是总剂量辐照使得NMOS器件的栅氧化层靠近Si界面处的Si—Si键断裂,形成悬挂键,在总剂量辐照时俘获空穴产生E'中心(见图8),形成带正电的氧化层陷阱电荷,但在热载流子测试中,由于热电子注入氧化层中,悬挂键中的空穴被电子复合,且由于热电子数量较多,其复合的速度要远远大于退火时氧化层陷阱电荷复合的速度,这也使得器件氧化层陷阱俘获电子,从而使得阈值电压正向漂移<sup>[1,2]</sup>;另外由于总剂量辐照效应,Si-SiO<sub>2</sub>界面处形成Si—悬挂键,形成Pb中心(见图8),俘获电子,形成辐射感生界面态电荷。

若在总剂量辐照后进行高温退火试验,使得总剂量辐照产生的辐射感生陷阱电荷绝大部分被复合掉,再进行热载流子试验,即2#样品的结果.由于总剂量辐照和热载流子试验使得器件发生退火效应的主要原因是器件氧化层内和界面处产生氧化层陷阱电荷和界面态电荷,因此我们可以用这两种电荷来对2#样品的试验结果进行分析。

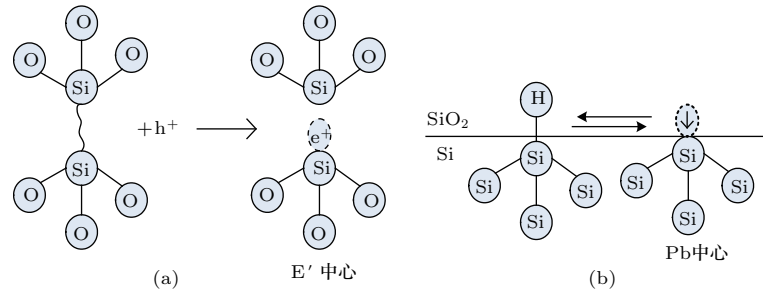


图8 陷阱中心的形成 (a) E' 中心; (b) Pb 中心 [5]

Fig. 8. The trap centers: (a) E' center; (b) Pb center [5].

图9所示为2#样品在总剂量辐照试验、辐照后退火试验及热载流子测试中阈值电压漂移值( $\Delta V_{th}$ )、辐照感生氧化层陷阱电荷引起的阈值电压漂移值( $\Delta V_{ot}$ )以及辐照感生界面陷阱电荷引起的阈值电压漂移值( $\Delta V_{it}$ )随时间的变化. 图10为2#样品在总剂量辐照试验、辐照后退火试验及热载流子测试中亚阈摆幅的变化.

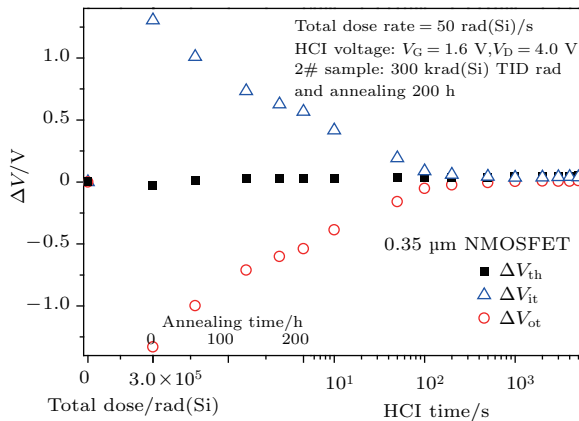


图9 2#样品氧化层陷阱电荷及界面态电荷引起的阈值电压变化

Fig. 9. The values of  $\Delta V_{th}$ ,  $\Delta V_{ot}$  and  $\Delta V_{it}$  versus times during TID, annealing and HCI test for 2# sample.

根据MOS器件亚阈的电压-电流方程可得出亚阈摆幅 $SS$ 的公式 [11]:

$$SS \equiv \ln 10 \times \frac{dV_G}{d(\ln I_D)}. \quad (1)$$

在  $a = \sqrt{2} \left( \frac{\epsilon_s}{\epsilon_i} \right) \left( \frac{d}{L_D} \right) \gg \left( \frac{C_D}{C_i} \right)$  时, 亚阈摆幅 $SS$ 可简写为

$$SS \cong \frac{kT}{q} \ln 10 \times \left( 1 + \frac{C_D + C_{it}}{C_i} \right), \quad (2)$$

其中,  $\epsilon_s$  为硅的介电常数,  $\epsilon_i$  为真空介电常数,  $d$  为栅氧化层厚度,  $L_D$  为德拜长度,  $C_D$  为耗尽层电容,

$C_i$  为氧化层电容,  $C_{it}$  为界面态电容 ( $C_{it} = q \times D_{it}$ ,  $D_{it}$  为界面态密度). 由此可知亚阈摆幅 $SS$ 是界面态密度 $D_{it}$ 的函数.

由图3和图9可知, 总剂量辐照引起 $0.35 \mu\text{m}$  NMOS器件阈值电压发生负向漂移, 亚阈摆幅增大(见图10), 从辐射感生电荷分析(见图9), 表现为辐射感生氧化层陷阱电荷和辐射感生界面陷阱电荷增大.

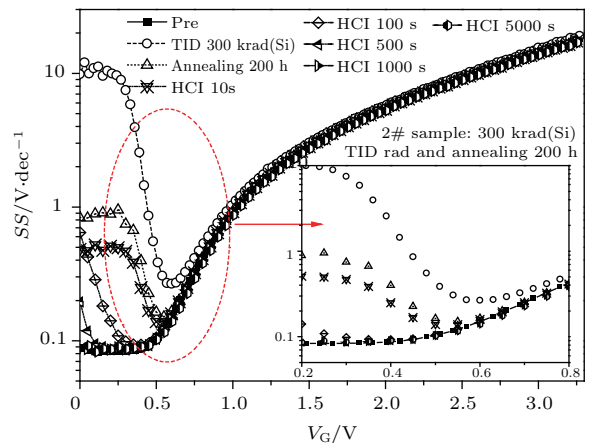


图10 2#样品辐照、高温退火及热载流子测试中亚阈摆幅 $SS-V_G$ 曲线

Fig. 10. The  $SS-V_G$  curves of TID, annealing and HCI testing for 2# sample.

但随着高温退火时间的增加, 辐射感生氧化层陷阱电荷密度和辐射感生界面陷阱电荷密度随之大幅度减小, 阈值电压随之向正向漂移, 同时 $SS$ 也大幅度减小, 这验证了NMOS器件 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 界面陷阱电荷密度也随之减小. 高温退火后, 在热载流子测试中随着测试时间的增加, NMOS器件辐射感生氧化层陷阱电荷密度和辐射感生界面陷阱电荷密度随之大幅度减小. 图11所示为热载流子测试中2#样品和3#样品氧化层陷阱电荷及界面态电荷引起的阈值电压变化. 从图11可以很明显地看出,

在热载流子测试中, 由于总剂量辐照引起的辐射感生氧化层陷阱电荷为正电荷, 界面陷阱电荷为负电荷, 试验中由于热电子注入氧化层中, 正的氧化层陷阱电荷与注入的热电子复合, 使得氧化层陷阱电荷持续减小, 且由于注入的热电子增多, 氧化层陷阱复合热电子, 使得氧化层陷阱电荷呈现负电性. 如图 11 中, 在 1000 s 热载流子测试后, 氧化层陷阱电荷引起的阈值电压漂移由负向变为正向. 而 2# 样品在热载流子测试中开始时 (0—1000 s) 界面陷阱电荷引起的阈值电压是随着热载流子测试时间而不断向负向漂移, 即俘获电子的界面陷阱电荷密度不断减小, 界面陷阱俘获的电子在电场的作用下向正的栅极及漏极运动, 从而使得界面处负的界面陷阱电荷降低. 随着热载流子测试时间的持续, 界面陷阱电荷引起的阈值电压漂移值  $\Delta V_{it}$  开始缓慢增大, 这是由于辐照感生界面陷阱俘获的电子向栅极运动后, 由于源区的热电子一直注入氧化层和界面处, 因此部分悬挂的 Pb 中心重新俘获电子, 从而使得带负电的界面陷阱电荷密度增大.

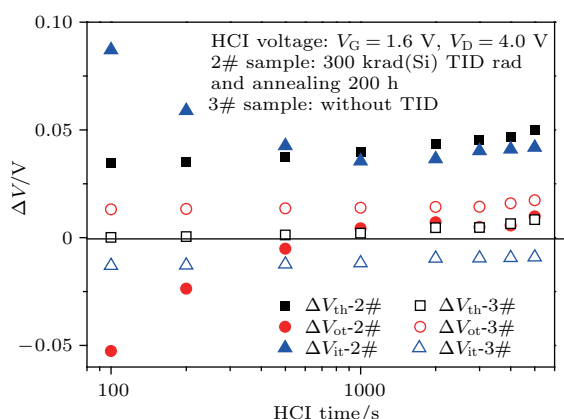


图 11 热载流子测试中 2# 和 3# 样品氧化层陷阱电荷及界面态电荷引起的阈值电压变化

Fig. 11. The values of  $\Delta V_{th}$ ,  $\Delta V_{ot}$  and  $\Delta V_{it}$  versus times during HCI test for 2# and 3# samples.

对于未经过总剂量辐照的 3# 样品而言, 在热载流子测试时, 阈值电压漂移值极小; 氧化层陷阱电荷引起的阈值电压漂移值为正, 即氧化层陷阱电荷呈负电性, 这是氧化层陷阱俘获注入的热电子形成的, 且随着热载流子试验时间的增加, 氧化层陷阱电荷密度缓慢增大. 而 3# 样品的界面陷阱电荷引起的阈值电压漂移值为负, 即界面陷阱电荷呈现为正电性, 并随着热载流子测试时间的增加而减小, 这可能是由于热载流子测试初期耗尽层中部分电子空穴对由于电子向氧化层中注入, 使得界面处

空穴居多, 因此使得界面陷阱电荷呈现正电性, 但随着热载流子测试时间的增加, 源区的电子不断注入界面及氧化层中, 使得界面陷阱电荷部分被复合, 因此使界面陷阱电荷密度减小, 其界面陷阱电荷引起的阈值电压漂移值也减小.

## 5 结 论

本文研究了 100 krad(Si) 总剂量辐照对 0.35  $\mu\text{m}$  NMOS 器件热载流子效应的影响, 发现两者的协同效应并不是两种效应的简单叠加, 经过总剂量辐照后的器件热载流子测试时阈值电压漂移要远远高于未辐照过的器件, 且总剂量辐照后, 未经过退火的样品比经过退火的样品的热载流子退化更加明显. 通过理论分析认为, 总剂量辐照感生的氧化层陷阱电荷在热载流子测试时俘获热电子从而被中和, 氧化层陷阱电荷减少, 并逐渐从正电性变为负电性; 但总剂量辐照感生界面陷阱电荷密度存在先减小后增大的趋势, 这是由于热载流子测试初期界面处电子空穴对中的电子向氧化层注入, 使得界面处电子被复合, 但随着热载流子测试时间增大, 源区电子向界面注入, 使得界面陷阱重新俘获电子; 氧化层陷阱电荷和界面陷阱电荷都为负电性, 使得阈值电压持续正向漂移.

## 参考文献

- [1] Fleetwood D M, Xiong H D, Lu Z Y 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 2674
- [2] Oldham T R, McLean F B 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 483
- [3] Hu C, Tam S C, Hsu F C 1985 *IEEE Trans. Electron Dev.* **32** 375
- [4] Heremans P, Bellens R, Groeseneken G 1988 *IEEE Trans. Electron Dev.* **35** 2194
- [5] Cui J W, Yu X F, Ren D Y, Lu J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 026102 (in Chinese) [崔江维, 余学峰, 任迪远, 卢健 2012 物理学报 **61** 026102]
- [6] Silvestri M, Gerardin S, Paccagnella A, Faccio F 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 3216
- [7] Ren D Y, Yu X F, Erkin, Zhang G Q, Lu W, Guo Q, Fan L, Yan R L 2001 *Res. Prog. SSE* **21** 103 (in Chinese) [任迪远, 余学峰, 艾尔肯, 张国强, 陆妩, 郭旗, 范隆, 严荣良 2001 固体电子学研究与进展 **21** 103]
- [8] Winokur P S, Schwank J R, McWhorter P J, Dressendorfer P V, Turpin D C 1984 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **31** 1453

- [9] Mileusnic S, Zivanov M, Habas P 2002 *11th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference Cairo, Egypt, May 7–9, 2002* p31 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 2758
- [10] Ang C H, Ling C H, Cheng Z Y, Kim S J, Cho B J 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 2758
- [11] Sze S M 1988 *Physics of Semiconductor Devices* (Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. ) p431

# Total dose dependence of hot carrier injection effect in the n-channel metal oxide semiconductor devices\*

He Yu-Juan<sup>†</sup> Zhang Xiao-Wen Liu Yuan

(Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory, the Fifth Electronics Research Institute of Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 510610, China)

( Received 11 July 2016; revised manuscript received 29 August 2016 )

## Abstract

The equipment and devices which are long-time running in space are affected by space radiation effects and hot carrier injection effects at the same time which would reduce their optional times. Normally, the single mechanism test simulation method is used on the ground simulation test but the multi-mechanism effect affects the space equipments and devices, including total irradiation dose effect, hot carrier injection effect, etc. The total dose dependence of hot carrier injection (HCI) effect in the 0.35  $\mu\text{m}$  n-channel metal oxide

semiconductor (NMOS) device is studied in this paper. Three samples are tested under different conditions (sample 1# with total irradiation dose (TID) and HCI test, sample 2# with TID, annealing and HCI test, sample 3# only with HCI test). The results show that threshold voltage of NMOS device with 5000 s HCI test after 100 krad (Si) total dose radiation has been negatively shifted then positively during total dose irradiation test and HCI test, and the threshold is higher than that of the device without radiation test. But the threshold voltage shift of NMOS device with 5000 s HCI test and 200 h annealing test after TID test is higher than that of the devices without radiation test and lower than that of the devices without annealing test. That is, the parameters of NMOS device vary faster with the combined effects (including the total dose irradiation effect and HCI effect) than with single mechanism effect. It is indicated that the hot electrons are trapped by the oxide trap charges induced by irradiation effect and then become a recombination centre. And then the oxide trap charges induced by irradiation effect reduce and become negative electronic. The interface trap charges induced by irradiation effect are reduced and then increased it is because the electrons of hole-electron pairs in the Si-SiO<sub>2</sub> interface are recombined by oxide traps in the oxide during the forepart of HCI test but then the electrons are trapped by interface traps in the Si-SiO<sub>2</sub> interface because the electrons from source area are injected to interface during the HCI test. So the threshold voltage is positively shifted due to the negative oxide trap charges and interface trap charges. The association effect is attributed to the reduction of oxide traps induced by recombination with hot electrons and the increase of the interface traps induced by irradiation trapped hot electrons.

**Keywords:** total irradiation dose, hot carrier injection, association effects

**PACS:** 61.80.Ed, 61.80.Jh, 73.40.Qv

**DOI:** 10.7498/aps.65.246101

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61574048, 61204112) and the Science and Technology Research Project of Guangdong, China (Grant No. 2015B090912002).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [heyu0000@126.com](mailto:heyu0000@126.com)