

# 体效应对超深亚微米 SOI 器件总剂量效应的影响

席善学<sup>1,2,3</sup>, 陆 妩<sup>2,3</sup>, 郑齐文<sup>2,3</sup>, 崔江维<sup>2,3</sup>, 魏 莹<sup>2,3</sup>, 姚 帅<sup>1,2,3</sup>, 赵京昊<sup>1,2,3</sup>, 郭 旗<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院大学, 北京, 100049;

2. 中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室; 中国科学院新疆理化技术研究所, 新疆乌鲁木齐, 830011;

3. 新疆电子信息材料与器件重点实验室, 新疆乌鲁木齐, 830011)

**摘 要:** 研究体偏置效应对超深亚微米绝缘体上硅(SOI, Silicon-on-insulator)器件总剂量效应的影响. 在 TG 偏置下, 辐照 130nm PD(部分耗尽, partially depleted) SOI NMOSFET(N 型金属-氧化物半导体场效应晶体管, n-type Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)器件, 监测辐照前后在不同体偏压下器件的电学参数. 短沟道器件受到总剂量辐照影响更敏感, 且宽长比越大, 辐射导致的器件损伤亦更大. 在辐射一定剂量后, 部分耗尽器件将转变为全耗尽器件, 并且可以观察到辐射诱导的耦合效应. 对于 10 $\mu\text{m}$ /0.35 $\mu\text{m}$  的器件, 辐照后出现了明显的阈值电压漂移和大的泄漏电流. 辐照前体偏压为负时的转移特性曲线相比于体电压为零时发生了正向漂移. 当体电压  $V_b = -1.1\text{V}$  时部分耗尽器件变为全耗尽器件,  $|V_b|$  的继续增加无法导致耗尽区宽度的继续增加, 说明体区负偏压已经无法实现耗尽区宽度的调制, 因此器件的转移特性曲线也没有出现类似辐照前的正向漂移.

**关键词:** 总剂量效应; 绝缘体上硅; 体效应; 浅沟槽隔离

**中图分类号:** TN3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)05-1065-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.05.013

## The Impact of Body Effect on TID of Ultra Deep Sub Micron SOI Devices

XI Shan-xue<sup>1,2,3</sup>, LU Wu<sup>2,3</sup>, ZHENG Qi-wen<sup>2,3</sup>, CUI Jiang-wei<sup>2,3</sup>,  
WEI Ying<sup>2,3</sup>, YAO Shuai<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Jing-hao<sup>1,2,3</sup>, GUO Qi<sup>2,3</sup>

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Key Laboratory of Functional Material and Devices for Special Environment, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

3. Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Material and Device, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

**Abstract:** The impact of body effect on the total dose effect of ultra deep sub micron SOI devices is studied. 130nm SOI NMOSFET devices were irradiated in TG bias state, the electrical parameters of devices before and after irradiation were monitored under different body bias. The short channel PD SOI NMOS devices are more sensitive to total dose radiation, and the larger channel width to length ratio of devices will cause more damage. After a certain dose of radiation, the partially depleted devices will turn into fully depleted devices, and the radiation-induced coupling effect can be observed. Significant threshold voltage shifts and large leakage currents can be observed after irradiation of 10 $\mu\text{m}$ /0.35 $\mu\text{m}$  devices. The transfer characteristic curve at negative body bias is positively shifted compared with it at zero body bias before the device is irradiated. When the body voltage  $V_b = -1.1\text{V}$ , then partially depleted devices become full-depletion devices. And continued increase in  $|V_b|$  will not result in continued increase in the width of the depletion area, which shows that the negative body bias can no longer adjust the width of the depletion region, so the transfer characteristic curve of the device does not show a positive shift similar to that before irradiation.

**Key words:** total-ionizing-dose; silicon-on-insulator; body effect; shallow trench isolation

### 1 引言

随着空间电子技术的发展,大量的电子器件被运

用到太空环境中. 暴露在空间中的电子器件非常容易受到空间中各种宇宙射线对的影响,产生各种辐射效应<sup>[1]</sup>. 在空间中长期工作的电子元器件会随着不断累

积的辐射剂量而产生总剂量效应,表现为器件氧化层介质中大量陷阱电荷的产生,影响器件电学参数,严重时可导致器件不能正常工作.绝缘体上硅技术与传统体硅器件相比具有几个固有的潜在优势,可在辐射恶劣的环境中运行<sup>[2,3]</sup>.由于SOI实现了完全的介质隔离,使得寄生电容大大减小,并且具有抗单粒子效应,瞬态效应等优势,非常适合应用于低功耗抗辐射电路.然而由于相对较厚的埋藏氧化物(BOX, Buried-Oxide)和浅沟槽隔离(STI, shallow trench isolation)仍然对总剂量效应非常敏感,并且使得总剂量(TID, Total-Ionizing-Dose)效应在SOI技术中变得更加复杂<sup>[4]</sup>.

H型栅SOI器件由于其在工艺上实现了完全的介质隔离,这意味着导电沟道不与STI氧化物直接接触,从而避免了辐射在STI中产生的陷阱电荷对器件产生的影响,H型栅SOI器件已被广泛用于与抗辐射加固电路<sup>[5]</sup>.然而由于其仍然存在埋藏氧化物,使得总剂量TID效应在H型栅SOI技术中亦不可忽略.BOX中的辐射诱导的陷阱电荷导致部分耗尽(PD, Partial depleted)SOI NMOSFET的亚阈值区域中的漏电流增加.对于全耗尽(FD, Fully depleted)SOI器件,正栅晶体管与背栅晶体管耦合,并且掩埋氧化物中的辐射诱导电荷累积将直接影响正栅晶体管特性<sup>[6]</sup>.几项工作已经证明,BOX中的陷阱正电荷可以在全耗尽SOI晶体管中引起正栅阈值电压的大的负向漂移<sup>[3,7]</sup>.国内外开展了一些针对SOI器件体偏置效应的工作<sup>[8-10]</sup>,然而由于实际电路中存在着许多不同尺寸的晶体管,目前的文献缺少针对不同沟道宽长比范围的SOI器件开展总剂量效应与体偏置效应影响的研究工作.基于以上情况,本文做了相关研究工作,分析了TC辐射偏置下的处于不同体偏压的器件的转移特性曲线,对SOI器件总剂量下的体偏置效应现象作了探讨.

## 2 实验描述

实验中使用的所有样品均采用130nm部分耗尽SOI工艺制造,器件顶层硅厚度为100nm,绝缘埋层厚度为145nm.实验所用器件均为输入/输出NMOS器件,宽长比为 $10\mu\text{m}/10\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}/0.35\mu\text{m}$ 、 $0.15\mu\text{m}/10\mu\text{m}$ 和 $0.15\mu\text{m}/0.35\mu\text{m}$ .所有器件都具有130nm厚的多晶硅栅极和65nm宽的隔离物.H型栅极PD SOI NMOSFET的布局如图1所示.引入浅沟槽隔离(STI)与底部的掩埋氧化物连接,用于场隔离.用于隔离晶体管的STI氧化物不会随着器件缩放而缩小,并且在深亚微米技术中仍然具有大的厚度,因此预期该氧化物对辐射非常敏感.H型栅极产生完全无边界的器件,这意味着导电沟道不与STI氧化物接触,因此它避免了STI受到辐射而对器件产生的任何影响.器件栅氧厚度约为6.7nm,工作电压为3.3V.由图2可看到,除了正栅主晶体管 $M_{fc}$ 外,该器件结构还包含一个背栅寄生晶体管

$M_{bc}$ ,寄生晶体管 $M_{bc}$ 以绝缘埋层BOX为栅氧,与主晶体管有相同的沟道长度.辐照实验采用中科院新疆理化所的 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线作为辐照源,剂量率为 $100\text{rad}(\text{Si})/\text{s}$ .辐照过程中器件处于TC偏置状态,TC( $V_{ss} = V_{ds} = V_{dd}$ )是PD SOI NMOSFET的最恶劣偏置状态,这与国内外很多研究结果一致<sup>[11,12]</sup>.辐照前后利用Keithley 4200半导体参数分析仪测试器件的转移特性曲线.所有测试在三十分分钟内完成以避免辐照退火效应的影响.整个辐照和测试过程均在室温下进行,MOSFET的阈值电压均为漏极电流达到的 $(W/L) \times 10^{-7}\text{A}$ 时所对应的栅压<sup>[13]</sup>.

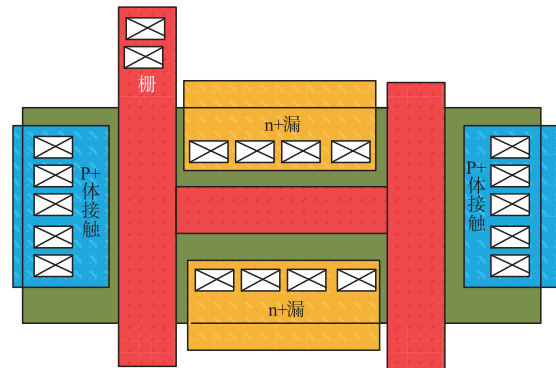


图1 H形栅 SOI 器件版图结构

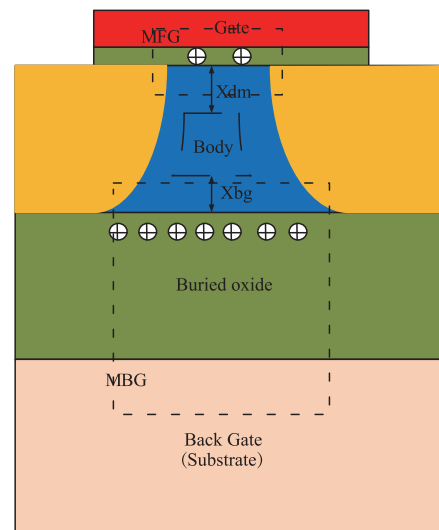


图2 H栅SOI器件正栅和背栅晶体管与辐照导致的正栅与背栅耦合效应

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 辐射增强的短沟道效应

对于SOI NMOSFET器件来说,经过辐照后SOI NMOS器件最突出的退化主要表现在两方面:关态泄漏电流的增大和阈值电压的漂移.图3显示了四种不同宽长比的SOI NMOS器件经过TC偏置辐照后,正栅的转移特性随辐照剂量的变化.在转移特性测试过程中,器件衬底和体接触接地.由图4的阈值电压随不同剂量变化曲线可以看到, $10\mu\text{m}/10\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}/0.35\mu\text{m}$ 、 $0.15\mu\text{m}$

$/10\mu\text{m}$  和  $0.15\mu\text{m}/0.35\mu\text{m}$  四种尺寸的器件均出现了阈值电压漂移。500krad (Si) 时,短沟道器件 ( $10\mu\text{m}/0.35\mu\text{m}$  和  $0.15\mu\text{m}/0.35\mu\text{m}$ ) 观察到了最明显的阈值电压漂移,达到了 220mV,特别是  $10\mu\text{m}/0.35\mu\text{m}$  器件在阈值电压减小的同时泄漏电流也明显增大,500krad

(Si) 时的关态漏电流相比于辐照前上升了 6 个数量级。值得注意的是,相较于  $10\mu\text{m}/10\mu\text{m}$  和  $0.15\mu\text{m}/10\mu\text{m}$  器件, $10\mu\text{m}/0.13\mu\text{m}$  和  $0.15\mu\text{m}/0.35\mu\text{m}$  器件出现了辐照增强的短沟道效应,并且宽长比越大,损伤越严重。

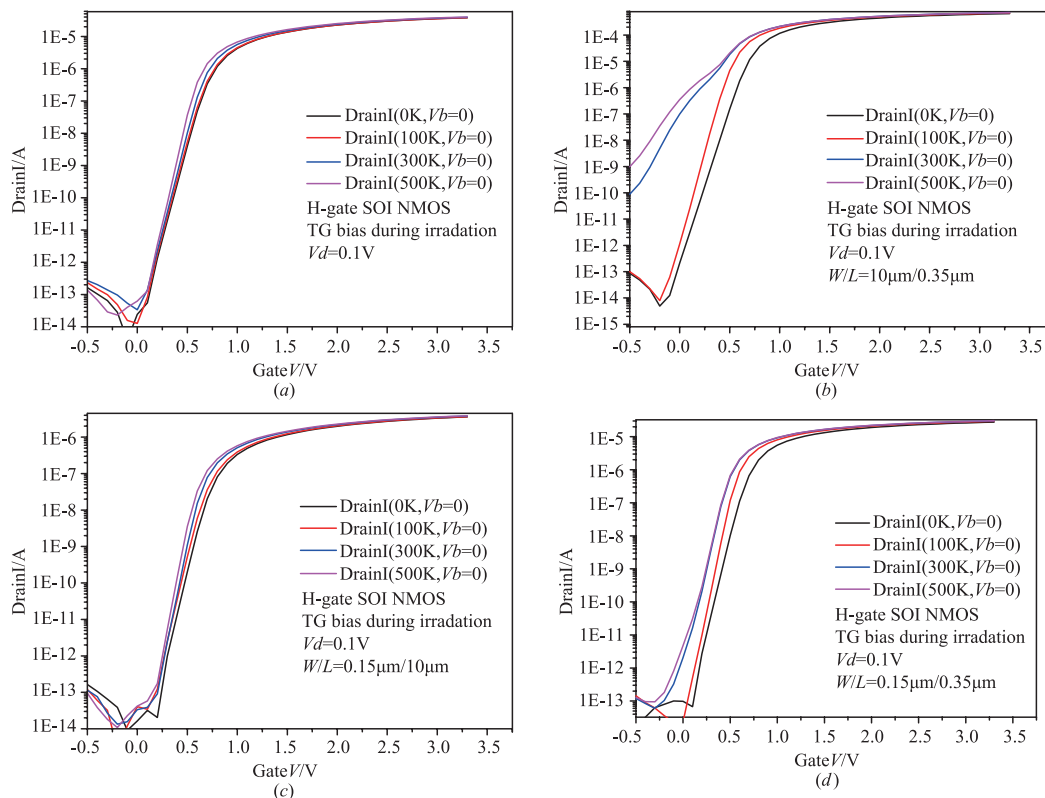


图3 H栅PD SOI器件辐照后转移特性曲线结果(a) $10\mu\text{m}/10\mu\text{m}$ ;(b) $10\mu\text{m}/0.35\mu\text{m}$ ;(c) $0.15\mu\text{m}/10\mu\text{m}$ ;(d) $0.15\mu\text{m}/0.35\mu\text{m}$

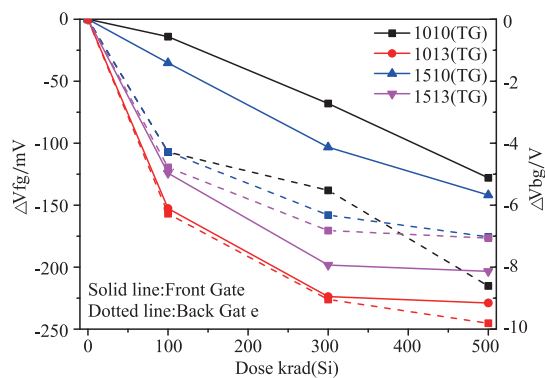


图4 不同尺寸H栅PD SOI器件辐照后正栅与背栅阈值电压变化

两种短沟道器件 ( $0.15\mu\text{m}/0.35\mu\text{m}$  和  $10\mu\text{m}/0.35\mu\text{m}$ ) 观察到了最明显的阈值电压漂移,该阈值电压漂移是来源于 BOX 氧化层导致的耗尽区电荷共享。由于 H 栅极器件可以避免 STI 横向寄生晶体管对主晶体管的干扰,因此正栅晶体管阈值电压漂移 ( $\Delta V_{FC}$ ) 主要来自两个方面:

$$\Delta V_{FC} = \Delta V_{OX} + \Delta V_{BOX} \quad (1)$$

$\Delta V_{OX}$ ,  $\Delta V_{BOX}$  分别表示栅极氧化物和掩埋氧化物中辐射

诱导陷阱电荷对正栅晶体管阈值电压漂移的影响。由于所有器件具有相同的超薄栅氧厚度,栅氧中的辐射感应陷阱电荷可以忽略不计。证明 BOX 中的氧化物陷阱正电荷对器件的正栅晶体管阈值电压漂移起了主要作用。这也说明  $10\mu\text{m}/0.35\mu\text{m}$  器件中观察到的正栅晶体管显著泄漏电流的产生主要因素也是 BOX 中的辐射感应陷阱电荷。与文献[9]中报道一致, TG 偏置下有更多的辐射诱导陷阱电荷被捕获在 BOX 中并导致正栅或背栅晶体管阈值电压的更大负偏移。图 4 中正栅晶体管与背栅晶体管的阈值电压漂移趋势大致相同,说明短沟道器件受到总剂量辐照影响更敏感,且对比  $0.15\mu\text{m}/0.35\mu\text{m}$  器件和  $10\mu\text{m}/0.35\mu\text{m}$  器件可知,同为短沟道器件,宽长比越大,辐射导致的器件损伤亦更大。这是因为更大的 BOX 的体积会有更多的辐射诱导的陷阱电荷产生,对 SOI 器件耗尽区的影响亦会增大。

### 3.2 体效应对总剂量效应的影响

图 2 显示了辐照后 PD SOI NMOSFET 中耗尽区的变化。在发生反型之前,在正栅晶体管沟道处形成最大

耗尽区. 最大耗尽宽度  $X_{FCM}$  可表示为:

$$X_{FCM} = \sqrt{\frac{4\epsilon_{si}\Phi_F}{qN_a}} \quad (2)$$

$$\Phi_F = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (3)$$

其中  $\epsilon_{si}$  是硅的介电常数,  $N_a$  是体掺杂浓度,  $n_i$  是本征载流子浓度,  $\Phi_F$  是费米势.  $X_{dm}$  小于顶层硅  $t_{si}$  的厚度, 因此该器件是部分耗尽器件. 在辐照后, 在 BOX 中的由辐射诱导的陷阱电荷将耗尽体区下半部分并进一步减小中性体的厚度. 在背栅出现反型之前, 背栅耗尽宽度  $X_{BC}$  可以达到  $X_{dm}$ . 如果顶层硅厚度小于  $X_{dm}$  的两倍, 则当在埋氧层中捕获足够的电荷时, 中性体区的上部分耗尽区和下部分耗尽区可以互联在一起, 此时部分耗尽的晶体管就像一个完全耗尽的晶体管. PDSOI 器件中的正栅和背栅耦合, 且  $\Delta V_{FG}$  漂移受到 BOX 层中俘获陷阱电荷引起的背栅阈值电压  $V_{BC}$  漂移的严重影响. 因此可看到正栅阈值电压的明显负向漂移. 只有满足以下条件, PDSOI 器件才有可能表现出辐射诱导耦合效应<sup>[5]</sup>:

$$t_{si} \leq X_{BC} + X_{dm} \leq 2X_{dm} \quad (4)$$

$$X_{BC} = \frac{Q_{BOX}}{qN_a} \quad (5)$$

其中  $t_{si}$  是顶层硅厚度,  $X_{BC}$  是背栅耗尽层的宽度,  $Q_{BOX}$  是 BOX 层中辐射诱导陷阱电荷密度.

对于本实验所选用的体区掺杂浓度为  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  器件, 正栅和背栅的最大耗尽区宽度大约为 62.2nm. 两者之和大于器件顶层硅厚度  $t_{si}$  (80nm), 理论上满足发生背栅耦合的条件.  $X_{BC}$  会随着埋氧层中辐射感应陷阱电荷密度的增加而增加直至达到最大耗尽区宽度. 只有当  $X_{BC}$  增加到满足式(4)时, 背栅耦合才会发生, 即观察到阈值电压漂移. 在相同的总剂量下, 短沟道器件 BOX 中更多的陷阱电荷形成, 导致了短沟道器件更易发生背栅耦合. 所以沟道长度为 0.35 $\mu\text{m}$  的器件中观察到了背栅耦合导致的阈值电压漂移, 而沟道长度为 10 $\mu\text{m}$  的器件没有观察到. 即使同为短沟道器件, 10 $\mu\text{m}$  / 0.35 $\mu\text{m}$  器件相较于 0.15 $\mu\text{m}$  / 0.35 $\mu\text{m}$

器件发生了更为严重的损伤, 这是因为更大的 BOX 体积会有更多的辐照诱导陷阱电荷产生. 辐照后, 背栅晶体管阈值电压负向漂移, 最终导致器件正栅晶体管阈值电压负漂和关态漏电流增加. 背栅晶体管与正栅晶体管共用体区, 因此可考虑在体区加负偏压, 利用体效应提高背栅晶体管的阈值, 从而削弱总剂量效应的影响.

PD SOI MOSFET 的体效应 (body-effect), 主要是来源于 MOS 管的 S-B (Source-Bulk) 端之间的偏压对 MOSFET 阈值电压  $V_{th}$  的影响: 以 NMOS 的晶体管为例, 当晶体管的源端电势高于体端电势时, 源和体区的二极管反偏程度增加, 栅下面的表面层中将有更多的空穴被吸引到 BOX, 使耗尽层中留下的不能移动的负离子增多, 耗尽层宽度增加, 耗尽层中的体电荷面密度  $Q_{dep}$  也增加, 所以阈值电压将升高.

图 5 显示了辐照前后不同体区偏压下 SOI 器件的转移特性曲线. 对于 10 $\mu\text{m}$  / 0.35 $\mu\text{m}$  的器件, 辐照前  $V_b < 0$  时的  $I-V$  曲线相比于  $V_b = 0$  时发生了正向漂移. 由于体效应的影响, 体区加负偏压使得器件反型时的耗尽层宽度增加, 从而导致了器件阈值电压增加. 当  $V_b = -1.1$  时正栅耗尽区已经增加到与顶层硅厚度相等, 器件处于全耗尽状态,  $|V_b|$  的增加无法导致耗尽区的继续增加,  $I-V$  曲线不随着  $|V_b|$  增加继续向右漂移. 辐照后体区负偏压对 10 $\mu\text{m}$  / 0.35 $\mu\text{m}$  器件的转移特性几乎无影响. 根据前面的分析, 辐照后 10 $\mu\text{m}$  / 0.35 $\mu\text{m}$  的器件已经处于全耗尽状态, 体区负偏压已经无法实现耗尽区宽度的调制, 因此  $I-V$  曲线也没有出现类似辐照前的正向漂移. 与短沟道器件不同, 10 $\mu\text{m}$  / 10 $\mu\text{m}$  的器件体区加负偏压会导致辐照后  $I-V$  曲线的正向漂移. 这进一步验证了前面的结果, 10 $\mu\text{m}$  / 10 $\mu\text{m}$  器件的体区在辐照后没有全耗尽. 因此能通过体区负偏压调制耗尽区的宽度, 从而增加正栅主晶体管, 导致 300krad (Si) 辐照后器件关态漏电流减小了半个数量级. 但由于 SOI 器件的顶层硅厚度 (即体区厚度) 为固定值且很薄, 体效应对 STI 寄生晶体管阈值电压的调制范围非常有限.

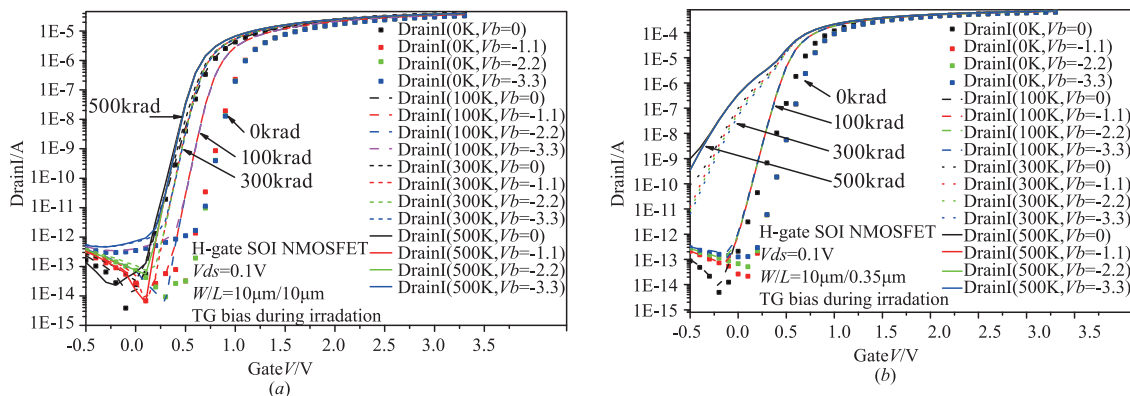


图5 辐照前和辐照后不同体偏压下前栅器件的转移特性曲线 (a) 10 $\mu\text{m}$ /10 $\mu\text{m}$ ; (b) 10 $\mu\text{m}$ /0.35 $\mu\text{m}$

## 4 结论

在最劣 TG 偏置下,以不同剂量的<sup>60</sup>Co 辐照 130nm SOI NMOSFET 器件,测试辐照前后器件在不同衬底偏压下的电学参数.对于 PD SOI NMOS 器件而言,短沟道器件会受到总剂量效应更为显著的影响,且宽长比越大的器件损伤越严重.掩埋氧化物中辐射导致的陷阱电荷将耗尽附近的中性体.在辐射一定剂量后,部分耗尽器件将转变为全耗尽器件,并且可以观察到辐射诱导的耦合效应.对于 10 $\mu\text{m}$ /0.35 $\mu\text{m}$  的器件,辐照后出现了明显的阈值电压漂移与大的漏电.辐照前衬底偏压为负时的转移特性曲线相比于衬底电压为零时发生了正向漂移.当衬底电压  $V_b = -1.1$  时正栅耗尽区已经增加到与顶层硅厚度相等,器件处于全耗尽状态, $|V_b|$  的继续增加无法导致耗尽区的继续增加,转移特性曲线不随着  $|V_b|$  增加继续向右漂移,说明体区负偏压已经无法实现耗尽区宽度的调制,体区负偏压对寄生晶体管的阈值电压进行调制,达到器件加固的目的,但受限于顶层硅的厚度,该调制作用非常有限.

### 参考文献

- [1] Fleetwood, D M. Total ionizing dose effects in mos and low-dose-rate-sensitive linear-bipolar devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007, 60(3): 1706 – 1730.
- [2] Barth J L, et al. Space, Aatmospheric, and terrestrial radiation environments[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(3): 466 – 482.
- [3] Schwank J R, et al. Radiation effects in MOS oxides[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(4): 11833 – 1853.
- [4] Zhang Meng-Ying, et al, Total ionizing dose response of different iength devices in 0.13 $\mu\text{m}$  partially depleted silicon-on-insulator technology[J]. Chinese Physics Letters, 2017, 34(8): 1 – 4.
- [5] Peng Chao, Hu Zhiyuan. Analysis of the totaldose-induced coupling effect in the partially depleted silicon-on-insulator NMOSFETs[A]. 2014 International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS) [C]. Guangzhou, 2014. 176 – 181.
- [6] Celler G K, Cristoloveanu S. Frontiers of silicon-on-insulator[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(9): 4955 – 4978.
- [7] Cristoloveanu S. Hot-carrier degradation mechanisms in silicon-oninsulator MOSFETs[J]. Microelectronics Reliability, 1997, 37(7): 1003 – 1013.
- [8] Terauchi M, Terada K. Self-body-biased' SOI MOSFET through 'depletion isolation effect[A]. 1999 IEEE International SOI Conference Proceedings [C]. Rohnert Park, CA, USA, 1999. 36 – 37.
- [9] Ning B X, et al. Bias dependence of TID radiation responses of 0.13 $\mu\text{m}$  partially depleted SOI NMOSFETs[J]. Microelectron Reliab, 2013; 53(1): 259 – 264.
- [10] Bi Jinshun, et al. Body bias effects on the single-event-transient response of PDSOI devices[A]. 2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS) [C]. Moscow, Russia, 2015: 14 – 18.
- [11] Ferlet-Cavrois V, et al. Worstcase bias during total dose irradiation of SOI transistors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2000, 47(6): 2183 – 2188.
- [12] 俞文杰, 张正选. 部分耗尽 SOI MOSFET 总剂量辐射效应的最恶劣偏置状态[J]. 功能材料与器件学报, 2007, 13(6): 549 – 553.  
Yu Wenjie, Zhang Zhengxuan, The worst bias state of total dose radiation effect of partially depleted SOI MOSFET[J]. Journal of Functional Materials and Devices. 2007, 13(6): 549 – 553. (in Chinese)
- [13] Peng Chao, et al. Total-ionizing-dose induced coupling effect in the 130 – nm PDSOI I/O nMOSFETs[J]. IEEE Electron Device Letters, 2014, 35(5): 503 – 505.

### 作者简介



席善学 男, 山东人, 中国科学院新疆理化技术研究所微电子学与固体电子学专业在读硕士研究生, 主要研究方向为 SOI 总剂量辐射效应研究.

E-mail: xishanxue@yeah.net



陆 婉(通讯作者) 女, 九三学社社员, 研究员, 博士生导师, 新疆大学兼职教授, 主要研究方向为微电子器件和模拟电路的总剂量辐射效应、损伤机理、评估方法及抗辐射加固技术.