文章编号：2095-4980(2022)06-0549-08

DSOI 总剂量效应模型及背偏调控模型

王海洋[1,2,3]，郑齐文[1,2]，崔江维[1,2]，李小龙[1,2]，李豫东[1,2]，李　博[4]，郭　旗[*1,2]

(1.中国科学院新疆理化技术研究所 中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；2.新疆电子信息材料与器件重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；3.中国科学院大学，北京 100049；4.中国科学院 微电子研究所，北京 100029)

摘　要：总剂量辐射效应会导致绝缘体上硅金属氧化物半导体场效应晶体管(DSOI MOSFET)器件的阈值电压漂移、泄漏电流增大等退化特性。由于背栅端口的存在，SOI器件存在新的总剂量效应加固途径，对于全耗尽SOI器件，利用正背栅耦合效应，可通过施加背栅偏置电压补偿辐照导致的器件参数退化。本文研究了总剂量辐照对双埋氧层绝缘体上硅金属氧化物半导体场效应晶体管(DSOI MOSFET)总剂量损伤规律及背栅偏置调控规律，分析了辐射导致晶体管电参数退化机理，建立了DSOI晶体管总剂量效应模拟电路仿真器(SPICE)模型。模型仿真晶体管阈值电压与实测结果≤6 mV，同时根据总剂量效应模型给出了相应的背栅偏置补偿模型，通过晶体管背偏调控总剂量效应SPICE模型仿真输出的补偿电压与试验测试结果对比，N型金属氧化物半导体场效应晶体管(NMOSFET)的背偏调控模型误差为9.65%，P型金属氧化物半导体场效应晶体管(PMOSFET)为5.24%，该模型可以准确反映DSOI器件辐照前后阈值特性变化，为器件的背栅加固提供参考依据。

关键词：双埋氧层绝缘体上硅；总剂量辐照；背偏调控；模型

中图分类号：TN43　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA2021418

DSOI total dose-effect model and back-bias control model

WANG Haiyang[1,2,3]，ZHENG Qiwen[1,2]，CUI Jiangwei[1,2]，LI Xiaolong[1,2]，LI Yudong[1,2]，LI Bo[4]，GUO Qi[*1,2]

(1.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；
2.Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Material and Device，Urumqi Xinjiang 830011，China；
3.University of Chinese Academy of Sciences，Beijing 100049，China；
4.Institute of Microelectronics，Chinese Academy of Sciences，Beijing 100029，China)

Abstract：The total dose damage to the Double buried oxide layer Silicon-On-Insulator silicon Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor(DSOI MOSFET) is studied as well as the regulation of the back gate bias by the total dose radiation. The mechanism of the degradation of the electrical parameters of the transistor caused by the radiation is analyzed, and DSOI transistor total dose effect Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis(SPICE) model is established. The model simulates the transistor threshold voltage, the simulated and measured results are below 6 mV. The corresponding back gate bias compensation model is given according to the total dose effect model. The SPICE model simulation output of the total dose effect is regulated by the transistor back bias. Comparing the compensation voltage with the experimental test results, the error of the back-bias control model of NMOSFET is 9.65%, and that of PMOSFET is 5.24%.

Keywords：Double Silicon On Insulator；Total Dose Irradiation；back gate bias control；model

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

收稿日期：2021-12-15；**修回日期：**2022-04-18

基金项目：国家自然科学基金资助项目(12075313)；新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2021D01E06)；中科院西部之光资助项目(2018-XBQNXZ-B-003)；中国科学院青年创新促进会资助项目(2020430；2018473)

[*]**通信作者：**郭　旗　email:guoqi@ms.xjb.ac.cn

空间中宇宙射线的影响，产生各种辐射效应[1]。随着绝缘体上硅(SOI)技术广泛地应用在航天领域，其辐射效应受到了广泛关注[2−5]。当电子元器件长期工作在辐射环境下，伴随着辐射剂量不断累积将产生总剂量效应，表现为器件介质层中形成大量的陷阱电荷，最终导致器件性能永久退化。由于SOI器件全介质隔离的结构，其对总剂量效应尤其敏感。

SOI工艺是指在顶层硅和背衬底之间引入一层埋氧化层(Buried Oxide，BOX)。通过在绝缘体上形成半导体薄膜，使SOI工艺具备全介质隔离、寄生电容小、速度快等优势[6−7]。特殊的全介质隔离及超薄有源区结构使SOI工艺具备很强的抗单粒子闩锁、单粒子翻转等瞬时辐射的能力[8]，在航天任务中有重要应用价值。但是由于特殊BOX的存在，SOI器件面临更为复杂的总剂量辐射效应(Total Ionizing Dose，TID)，除了与体硅器件一致的栅氧化物与隔离氧化物辐射损伤，辐射在BOX层引入陷阱电荷同样导致器件电参数退化。总剂量效应是SOI器件辐射环境应用需要解决的关键问题[9]。

由于背栅端口的存在，SOI器件存在新的总剂量效应加固途径。对于全耗尽SOI器件，利用正背栅耦合效应，可通过施加背栅偏置电压补偿辐照导致的器件参数退化[10]。然而，由于一个反向偏置用于整个电路，背栅偏置对N通道和P通道器件阈值的影响是相反的，因此不能在电路水平上实现完全恢复。双埋氧层SOI(Double-SOI，DSOI)可以很好地解决这一问题，与通常的SOI材料相比，DSOI有两个硅层，分别为器件的顶层Si(SOI1)和作为屏蔽或第二栅电极的中层Si(SOI2)层，厚度在几十纳米，SOI2将BOX层分为BOX1和BOX2，即DSOI[11]；。SOI2作为一个独立的电极，可以有效控制BOX1层的内部电场，减轻TID效应[12−14]。这种灵活的加固策略在电路层面上也是有用的，因为可以根据晶体管的TID响应差异性施加不同的补偿电压。

本文针对180 nm FD SOI工艺制造的DSOI NMOSFET和PMOSFET进行了总剂量辐照实验，获得了总剂量辐射对晶体管阈值电压的影响规律，分析了辐射导致晶体管电参数退化机理，并建立了DSOI晶体管总剂量效应SPICE模型，模型仿真晶体管阈值电压与实测结果≤6 mV，同时根据总剂量效应模型给出了辐照后的背偏置调控模型，通过晶体管背偏调控总剂量效应SPICE模型仿真输出的补偿电压与试验测试结果对比，NMOSFET的背偏调控模型误差为9.65%，PMOSFET为5.24%。

1 实验内容及条件

实验中使用的样品均为采用180 nm FD SOI工艺制造的DSOI器件，如图1所示。器件顶层硅膜厚度为50 nm，BOX厚度为145 nm，栅氧化层厚度约为4.1 nm。晶体管版图设计采用环栅结构，NMOSFET的沟道宽长比为4 μm/0.2 μm，PMOSFET的沟道宽长比为4 μm/0.18 μm。辐照偏置条件为关闭(OFF)状态，晶体管各端口偏置条件如表1所示。辐照前及各累积剂量点对晶体管进行转移特性曲线测试，NMOSFET栅端扫描电压范围为0~1.8 V，扫描步长0.02 V，PMOSFET栅端扫描电压范围为−1.8~0 V，扫描步长0.02 V，NMOSFET漏端电压为0.1 V，PMOSFET漏端电压为−0.1 V。为研究背偏置调控对晶体管总剂量辐射效应的影响，试验中分别在不同背偏置电压条件下扫描了转移特性曲线，背偏置电压范围为−20~20 V。总剂量辐照试验在中国科学院新疆理化技术研究所大钴源进行，辐照剂量率为300 rad(Si)/s(以下剂量都为Si中剂量)，累积剂量点分别为100 krad,300 krad,500 krad,1 Mrad,2.7 Mrad,6 Mrad。晶体管参数测试在吉时利4200半导体参数测试仪上完成。

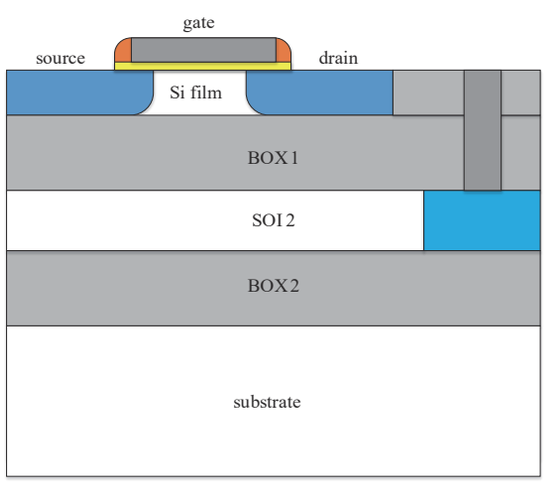

Fig.1 Structure of DSOI MOSFET
图1 DSOI MOSFET结构图

表1 DSOI器件辐照偏置条件及各端口偏置电压条件
Table 1 Irradiation bias conditions of DSOI device and bias voltage conditions of each port

	bias of NMOS/V	bias of PMOS/V
G	0	1.8
D	1.8	0
S	0	1.8
B	0	1.8
BG	0	1.8
Sub	0	0

2　实验结果

图 2 为总剂量辐射对 DSOI 工艺 NMOSFET 转移特性曲线的影响规律。如图所示，总剂量辐射使 NMOSFET 阈值电压减小，亚阈值区整体负向平移，辐射对晶体管亚阈值摆幅的影响较小。

图 3 为 NMOSFET 阈值电压随累积剂量的变化关系，阈值电压通过固定电流法提取($W/L\times10^{-7}$ A)。如图所示，总剂量辐射在 1 Mrad 范围内对晶体管阈值电压影响较大，1~6 Mrad 范围内影响趋于饱和。

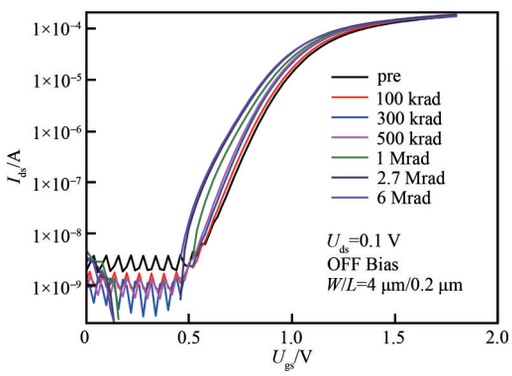

Fig.2 Influence of total dose radiation on transfer characteristic curves of NMOSFET in DSOI process

图 2　总剂量辐射对 DSOI 工艺 NMOSFET 转移特性曲线影响规律

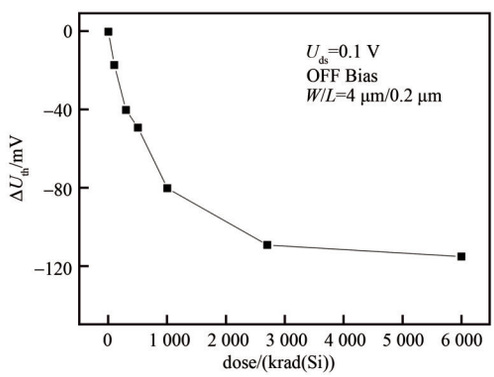

Fig.3 Influence of total dose radiation on threshold voltage of NMOSFET in DSOI process

图 3　总剂量辐射对 DSOI 工艺 NMOSFET 阈值电压影响规律

图 4 为总剂量辐射对 DSOI 工艺 PMOSFET 转移特性曲线的影响规律。总剂量辐射使 PMOSFET 阈值电压增大，亚阈值区整体向左平移，辐射对晶体管亚阈值摆幅的影响较小。

图 5 为 PMOSFET 阈值电压随累积剂量的变化关系，阈值电压通过固定电流法提取。总剂量辐射在 300 krad 对晶体管阈值电压影响达到饱和，300 krad~6 Mrad 范围内阈值电压基本不变。

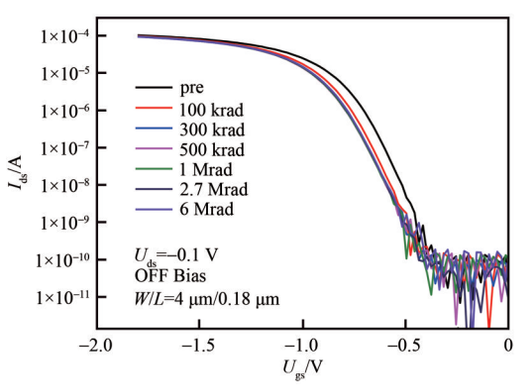

Fig.4 Influence of total dose radiation on transfer characteristic curve of PMOSFET in DSOI process

图 4　总剂量辐射对 DSOI 工艺 PMOSFET 转移特性曲线影响规律

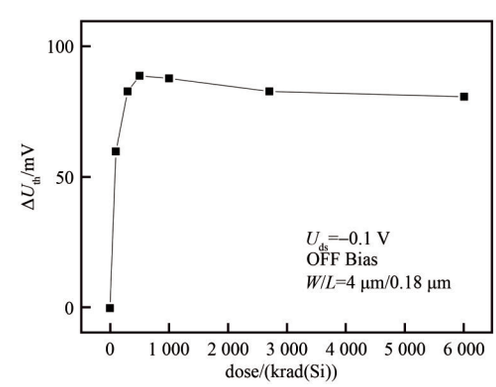

Fig.5 Influence of total dose radiation on threshold voltage of PMOSFET in DSOI process

图 5　总剂量辐射对 DSOI 工艺 PMOSFET 阈值电压影响规律

3　机理分析

总剂量辐射在绝缘介质产生氧化物陷阱电荷及界面陷阱电荷，使晶体管阈值电压漂移、载流子迁移率下降等。图 6 表示了 MOS 辐照损伤过程，高能入射粒子在氧化层(栅氧及埋氧层)中产生电离作用，生成电子–空穴对。当栅极加正偏压时，电子在 1 ps 时间内被扫出氧化物。空穴向 Si/SiO_2 界面处迁移。在电子穿过氧化层被电极收集之前，部分电子–空穴对发生复合。由于界面处的晶格缺陷及氧化层中氧的扩散，接近界面处存在大量的氧空位。未被复合的空穴向界面迁移时，一部分空穴被俘获，形成氧化物陷阱电荷。而同时由于高能电子或空穴在注入时，打破了 Si-Si 和 Si-O 键，或打破 Si-H 键，释放出 H 原子，在 Si/SiO_2 界面形成界面态。

MOS 型器件的阈值漂移都可表示为氧化物陷阱和界面态电荷引起阈值漂移之和：

$$\Delta U_{th}=\Delta U_{ot}+\Delta U_{it} \tag{1}$$

式中 ΔU_{ot} 和 ΔU_{it} 可由式(2)确定：

$$\Delta U_{\mathrm{ot,it}}=\frac{-1}{C_{\mathrm{ox}}t_{\mathrm{ox}}}\int_0^{t_{\mathrm{ox}}}\rho_{\mathrm{ot,it}}(x)x\mathrm{d}x \tag{2}$$

式中：t_{ox}为栅氧化物层厚度；C_{ox}为栅氧化层的单位面积电容；$\rho_{ot,it}$(x)为由氧化物俘获空穴及界面态导致的氧化物内电荷分布。

对于本次试验的DSOI工艺晶体管，采用环栅版图结构，隔离氧化物对晶体管电特性的影响可以忽略[15]，同时栅氧化物的厚度小于6 nm，总剂量辐射在栅介质引入陷阱电荷，在电子隧穿作用下快速退火[16]，所以BOX是

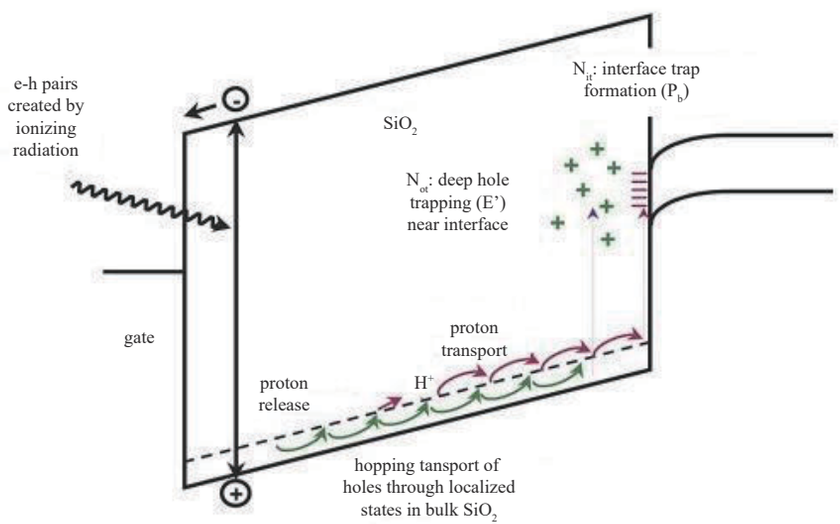

Fig.6 Schematic diagram of damage process of MOS structure by total dose irradiation

图6 MOS结构总剂量辐照损伤过程示意图

决定DSOI工艺晶体管总剂量效应的关键区域。总剂量辐射在BOX中引入氧化物陷阱电荷及界面陷阱电荷，界面陷阱电荷产生速度远小于氧化物陷阱电荷，而本次试验采用高剂量率辐照，辐照时间内不足以产生大量界面陷阱电荷，所以BOX层内的氧化物陷阱电荷对晶体管辐射损伤起主导作用。因此由式(2)可知正电荷可导致负的阈值电压漂移，而负电荷则导致正的阈值电压漂移，对于NMOS和PMOS氧化物陷阱电荷带正电，产生负的阈值电压漂移[17]。

对于NMOSFET，晶体管沟道区域采用P型掺杂，辐射引入的带正电的氧化物陷阱电荷使背沟道发生耗尽，根据全耗尽SOI工艺的正背栅耦合理论，背沟道界面发生耗尽会使正栅晶体管阈值电压减小。带正电的氧化物陷阱电荷可等效为正向的背偏置电压，如图7所示，正的背偏置电压可减小晶体管阈值电压，且晶体管阈值电压与背偏置电压呈线性相关。

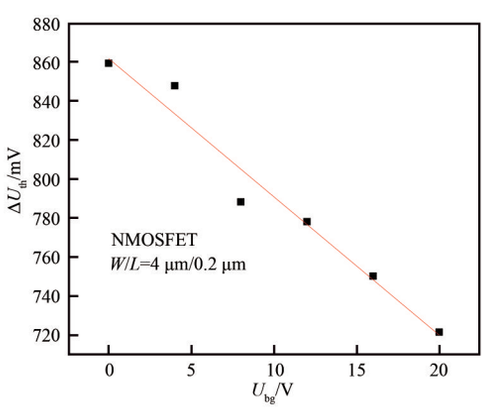

Fig.7 Influence of positive back bias voltage on NMOSFET threshold voltage in DSOI process

图7 正向背偏置电压对DSOI工艺NMOSFET阈值电压影响规律

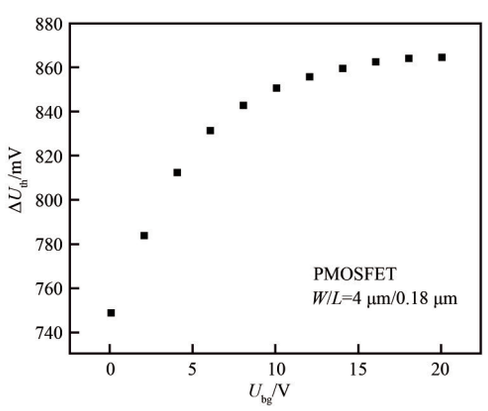

Fig.8 Influence of positive back bias voltage on threshold voltage of PMOSFET in DSOI process

图8 正向背偏置电压对DSOI工艺PMOSFET阈值电压影响规律

对于PMOSFET，晶体管沟道区域采用N型掺杂，辐射引入的带正电的氧化物陷阱电荷使背沟道发生积累，根据全耗尽SOI工艺的正背栅耦合理论，背沟道界面发生积累使PMOSFET阈值电压增加。如图8所示，300 krad

处总剂量辐射导致PMOSFET阈值电压出现了饱和，远小于NMOSFET的2.7 Mrad。与NMOSFET一致，对PMOSFET施加正向背偏置电压可以模拟辐射引入氧化物陷阱电荷对阈值电压的影响。如图8所示，正向背偏置电压可提升PMOSFET的阈值电压，但在10 V左右背偏置电压对阈值电压的影响即出现了饱和，与辐照试验结果一致。

3.1 总剂量效应模型

针对辐射敏感参数阈值电压，分别建立PMOSFET与NMOSFET的总剂量效应模型。在晶体管基础SPICE模型的基础上，建立累积剂量与晶体管阈值电压漂移的关系式，并嵌入SPICE模型，实现不同累积剂量条件下的晶体管辐射损伤的模拟仿真。

首先，建立辐射累积剂量与BOX层内氧化物陷阱电荷密度的关系。式(3)为辐射引入氧化物陷阱电荷与累积剂量的关系式，其中$N_{ot}(D)$表示累积剂量为D时的BOX层氧化物陷阱电荷密度，N_T为BOX层中氧空位密度，K_g为单位剂量BOX层内产生的电子空穴对密度，f_y为BOX层内的电荷逃逸率，σ_h为空穴俘获截面，t_{BOX}为BOX层厚度。

$$\mathrm{d}N_{ot}(D)=\left(N_T-N_{ot}(D)\right)\sigma_h K_g f_y t_{BOX}\mathrm{d}D \tag{3}$$

以上微分方程的初始条件为$N_{ot}(0)=0$，即累积剂量为0时，BOX层内没有氧化物陷阱电荷。根据初始条件求解以上微分方程为：

$$N_{ot}(D)=-N_T\exp(-\sigma_h K_g f_y t_{BOX}D)+N_T \tag{4}$$

对于NMOSFET，阈值电压与背偏置偏压呈线性关系，而辐射在BOX层内引入氧化物陷阱电荷可以等效为配置层偏置，且等效配置层偏置电压与氧化物陷阱电荷密度呈线性关系，进而辐射导致NMOSFET阈值电压漂移可表达为：

$$\left|\Delta U_{th}\right|=K_c K_e N_{ot}(D) \tag{5}$$

式中：K_e为氧化物陷阱电荷等效背偏置电压系数；K_c为配置层偏置与阈值电压的耦合系数；ΔU_{th}为辐射导致的晶体管阈值电压漂移。合并式(5)中的拟合参数，式(5)可以简化为：

$$\left|\Delta U_{th}\right|=-b\exp(-aD)+b \tag{6}$$

式中a,b为拟合参数。则NMOSFET的阈值电压可表达为：

$$U_{th}(D)=U_{th0}+b\exp(-aD)-b \tag{7}$$

式中：$U_{th}(D)$为不同累积剂量条件下的晶体管阈值电压；U_{th0}为辐照前晶体管阈值电压。

依据DSOI工艺NMOSFET阈值电压随累积剂量的测试结果，提取式(7)中的拟合参数，拟合结果如图9所示。图中方块点为试验测试结果，曲线为利用式(7)得到的拟合结果。可以看出，式(7)得到的晶体管阈值电压与试验结果可以很好地符合。DSOI工艺NMOSFET阈值电压随累积剂量变化关系方程可表达为：

$$U_{th}(D)=860+113.857\,7\times\exp(-0.001\,239D)-113.857\,7 \tag{8}$$

总剂量辐射对DSOI工艺PMOSFET阈值电压影响规律不同于NMOSFET，如图5所示，300 krad后晶体管阈值电压保持稳定，而在0~300 krad剂量范围内，辐射导致晶体管阈值电压上升。针对PMOSFET的辐射损伤特性，以300 krad剂量点为分界点，设置分段函数表达辐射对晶体管阈值电压的影响。在0~300 krad剂量范围内，辐射导致的PMOSFET阈值电压漂移同样可以表达为式(6)，进而PMOSFET阈值电压随累积剂量的变化关系可表达为：

$$U_{th}(D)=U_{th0}-b\exp(-aD)+b \tag{9}$$

300 rad~6 Mrad剂量范围内的PMOSFET阈值电压用常数表示。依据DSOI工艺PMOSFET阈值电压随累积剂量的测试结果，提取式(9)中的拟合参数，拟合结果如图10所示。图中方块点为试验测试结果，曲线为利用式(9)得到的拟合结果。DSOI工艺PMOSFET阈值电压随累积剂量变化关系方程可表达为：

$$U_{th}(D)=\begin{cases}750-85.2\exp(-0.012\,2D)+85.2,\ [0\sim300\ \mathrm{krad}]\\ 833,\ [300\ \mathrm{krad}\sim6\ \mathrm{Mrad}]\end{cases} \tag{10}$$

通过晶体管总剂量效应SPICE模型仿真输出阈值电压与试验测试结果对比，最大误差为6 mV。

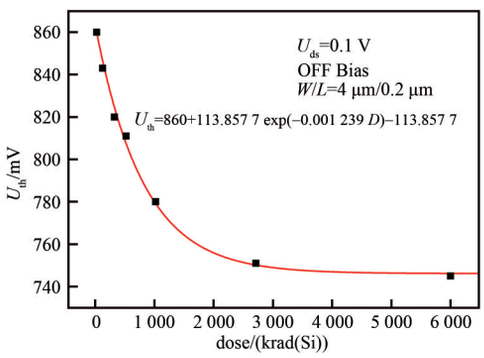

Fig.9 Fitting results of NMOSFET threshold voltage drift model in DSOI process caused by total dose radiation

图9 总剂量辐射导致DSOI工艺NMOSFET阈值电压漂移模型拟合结果

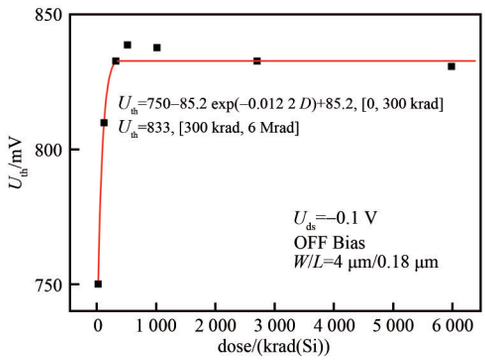

Fig.10 Fitting results of PMOSFET threshold voltage drift model in DSOI process caused by total dose radiation

图10 总剂量辐射导致DSOI工艺PMOSFET阈值电压漂移模型拟合结果

3.2 辐照后背偏置调控模型

由于总剂量产生的氧化物陷阱电荷可以等效为正向背偏置电压，而本文中所采用的DSOI器件辐照诱导阈值漂移完全由氧化物陷阱电荷引起，因此可以在背栅施加负的背偏置电压来抑制阈值的漂移，图11为DSOI工艺NMOSFET和PMOSFET在辐照后施加不同背偏置电压对阈值电压的影响规律，对于NMOSFET，随着负向背偏置电压的增加，辐照后的阈值电压漂移量逐渐减小；对于PMOSFET，负向背偏置电压同样可以减小辐照后的阈值电压漂移量，但随着电压的增加会出现过补偿的现象。

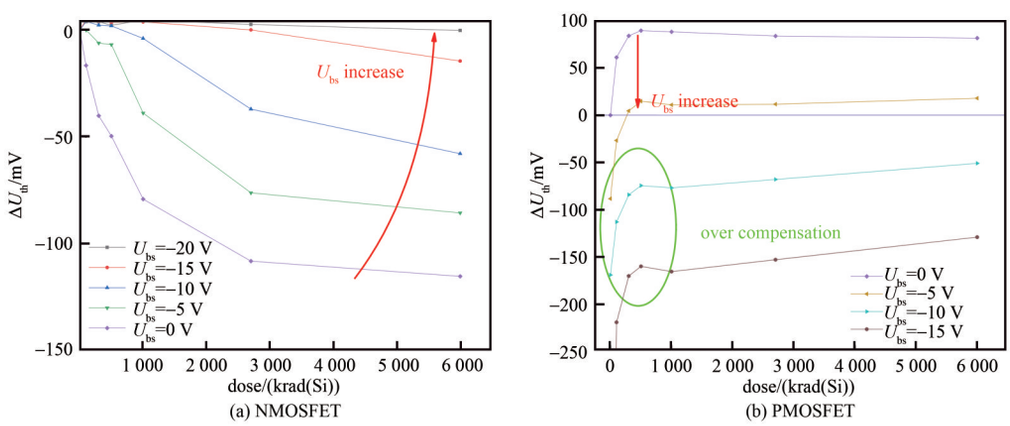

Fig.11 Influence of different back bias voltages on DSOI process transistor threshold voltage

图11 不同背偏置电压对DSOI工艺晶体管阈值电压影响规律

由于阈值电压与背偏置电压呈线性相关：

$$U_{th}(D)=K_c\times U_{bg}(D)+c \tag{11}$$

由式(7)和式(11)可以求得不同剂量下阈值电压保持不变需要的补偿电压：

$$U_{bg}(D)=\frac{U_{th0}+b\times\exp(-aD)-b-c}{K_c} \tag{12}$$

通过图6、图7可以提取公式中的拟合参数K_c和c，参数a和b为总剂量效应模型中对应参数。通过不同背偏下测量的辐照后阈值电压变化曲线拟合提取实际补偿电压，如图12所示，图中黑色方块对应的阀值即为辐照前晶体管阀值电压。最终得到的背偏置调控模型与实测结果对应关系如图13所示，图中红色方块为实测结果，黑色曲线为模型曲线。

DSOI工艺NMOSFET阈值电压随累积剂量变化关系方程可表达为：

$$U_{bg}(D)=15.313\,7\times\exp(-0.001\,239D)-16.657\,1 \tag{13}$$

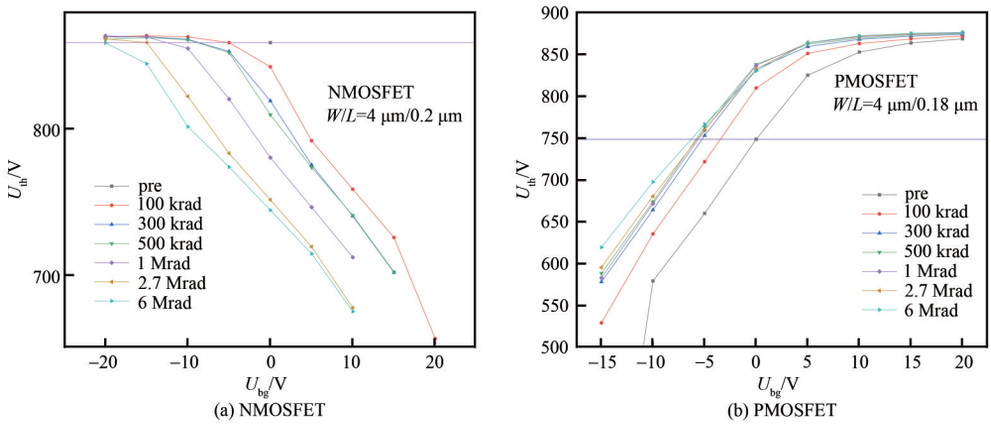

Fig.12 Change curves of measured transistor threshold voltage at different back bias voltages

图 12　不同背偏置电压下测量晶体管阈值电压变化曲线

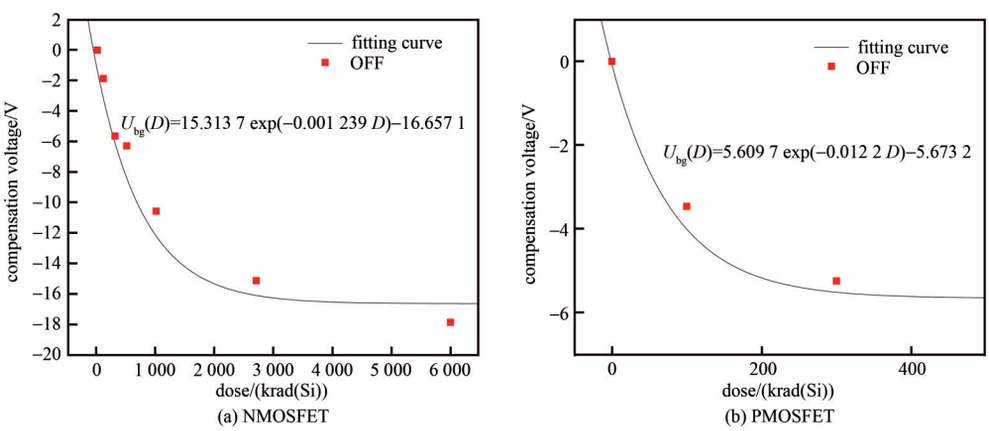

Fig.13 Model fitting and measured results of DSOI transistor threshold voltage regulated by back bias

图 13　背偏置调控 DSOI 晶体管阈值电压模型拟合及实测结果

DSOI 工艺 PMOSFET 阈值电压随累积剂量变化关系方程可表达为：

$$U_{bg}(D)=5.609\,7\times\exp(-0.012\,2D)-5.673\,2 \tag{14}$$

通过晶体管背偏调控总剂量效应 SPICE 模型仿真输出的补偿电压与试验测试结果对比，NMOSFET 的背偏调控模型误差为 9.65%，PMOSFET 为 5.24%。

4　结论

本文针对 180 nm FD SOI 工艺制造的 DSOI 器件进行总剂量辐照实验，获得了 DSOI 工艺晶体管的总剂量辐射损伤规律，揭示了辐射在 BOX 层引入陷阱电荷导致电参数退化机理，建立了 DSOI 工艺晶体管总剂量效应 SPICE 模型，模型仿真晶体管阈值电压与实测结果≤6 mV；并在此基础上给出了辐照后的背偏调控模型，通过模型仿真结果与实际测量结果对比，NMOSFET 的背偏调控模型误差为 9.65%，PMOSFET 为 5.24%。

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, 2013,60(3):1706-1730.

[2] REZZAK N,ZHANG E X,ALLES M L,et al. Total-ionizing-dose radiation response of 32 nm partially and 45 nm fully-depleted SOI devices[[C]// Proceedings of the IEEE International SOI Conference. San Diego,USA:IEEE, 2010:1.

[3] KUDINA V,CARBAR N,SIMOEN E,et al. Effect of extension architecture on the LF noise of UTBOX SOI MOSFETs[C]// 2015 International Conference on Noise and Fluctuations(ICNF). Xi'an,China:[s.n.], 2015:1-4.

[4] REZZAK N. Total-ionizing-dose radiation response of 32 nm partially and 45 nm fully-depleted SOI devices[C]// 2012 IEEE International SOI Conference(SOI). Napa,CA,USA:IEEE, 2012:1-2.

[5] SCHWANK J R,SHANEYFELT M R,DODD P E,et al. Hardness assurance for proton direct ionization-induced SEEs using a

high-energy proton beam[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014,61(6):2904-2914.

[6] BARNABY H J. Total-Ionizing-Dose effects in modern CMOS technologies[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006,53(6):3103-3121.

[7] SCHWANK Jim. Total dose effects in MOS devices[C]// IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference,Short Course. Cairo,Egypt:IEEE, 2002:88-91.

[8] GAILLARDIN M,RAINE M,PAILLET P,et al. Radiation effects in advanced SOI devices:new insights into total ionizing dose and Single-Event Effects[C]// 2013 IEEE SOI-3D-Subthreshold Microelectronics Technology Unified Conference(S3S). Monterey,CA:IEEE, 2013:1-2.

[9] LIU H Y, ANTONY D, HEIKKILA W, et al. Proton-induced upset in SOI CMOS SRAMS[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004,51(6):3475-3479.

[10] ZHENG Qiwen, CUI Jiangwei, XU Liewei, et al. Total ionizing dose responses of forward body bias ultra-thin body and buried oxide FD-SOI transistors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019,66(4):1.

[11] GAO Chuang, ZHAO Xing, ZHAO Kai, et al. DSOI-a novel structure enabling adjust circuit dynamically[J]. Journal of Semiconductors, 2016,37(6):065003.

[12] ZHAO Kai. DSOI FET-a novel TID tolerant SOI transistor[C]// 2014 12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology(ICSICT). Guilin,China:IEEE, 2015:1-3.

[13] LI B,WU J,GAO Y,et al. The total ionizing dose response of a DSOI 4 Kb SRAM[J]. Microelectronics Reliability, 2017(76):714-718.

[14] LI B,ZHAO K,WU J,et al. Electromagnetic susceptibility characterization of double SOI device[J]. Microelectronics Reliability, 2016(64):168-171.

[15] FERLET-CAVROIS V,COLLADANT T,PAILLET P,et al. Worst-case bias during total dose irradiation of SOI transistors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2000,47(6):2183-2188.

[16] 胡志良,贺朝会. 工艺参数对SOI NMOS总剂量效应的影响[J]. 核技术, 2010,33(10):779-782. (HU Zhiliang,HE Chaohui. Impact of process parameters on total ionizing dose effect on SOI NMOS[J]. Nuclear Techniques, 2010,33(10):779-782.)

[17] 席善学,郑齐文,崔江维,等. 超深亚微米SOI总剂量效应泄漏电流模型[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(6):1107-1111. (XI Shanxue, ZHENG Qiwen, CUI Jiangwei, et al. Leakage current model of Total Ionizing Dose effect in ultra deep submicron SOI MOSFET devices[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(6): 1107-1111.)

作者简介：

王海洋(1998-)，男，山西省朔州市人，在读硕士研究生，主要研究方向为SOI总剂量辐射效应及模型研究.email:827083469@qq.com.

郑齐文(1987-)，男，山东省济宁市人，博士，副研究员，主要研究方向为大规模集成电路测试、辐射效应、可靠性及SOI总剂量辐射效应及模型研究.

崔江维(1983-)，女，石家庄市人，研究员，博士生导师，主要研究方向为半导体材料和器件的辐射效应与可靠性.

李小龙(1988-)，男，甘肃省武威市人，博士，助理研究员，主要研究方向为电子元器件辐射效应及加速评估法.

李豫东(1982-)，男，新疆伊犁市人，研究员，博士生导师，主要研究方向为半导体器件和集成电路的辐射效应与机理、模拟试验方法、试验系统研究.

李　博(1983-)，男，石家庄市人，博士，研究员，主要研究方向为半导体器件和电路.

郭　旗(1964-)，男，乌鲁木齐市人，研究员，博士生导师，主要研究方向为电子元器件辐射效应、辐射损伤机理、模拟试验技术和空间辐射环境在轨测量技术.