

文章编号: 2095-4980(2019)06-1107-05

超深亚微米 SOI 总剂量效应泄漏电流模型

席善学^{1,2,3}, 郑齐文^{1,2}, 崔江维^{1,2}, 魏莹^{1,2}, 姚帅^{1,2,3}, 何承发^{1,2}, 郭旗^{1,2}, 陆妩^{*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)

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(SOI MOSFET)器件的阈值电压漂移、泄漏电流增大等退化特性。浅沟槽隔离(STI)漏电是器件退化的主要因素, 会形成漏极到源极的寄生晶体管。针对130 nm部分耗尽(PD) SOI NMOSFET器件的总剂量辐射退化特性, 建立了一个包含总剂量辐射效应的通用模拟电路仿真器(SPICE)模型。在BSIM SOI标准工艺集约模型的基础上, 增加了STI寄生晶体管泄漏电流模型, 并考虑了辐射陷阱电荷引起寄生晶体管的等效栅宽和栅氧厚度的变化。通过与不同漏压下、不同宽长比的器件退化特性的实验结果对比, 该模型能够准确反映器件辐射前后的漏电流特性变化, 为器件的抗辐射设计提供参考依据。

关键词: 总辐照剂量; 绝缘体上硅; 模型; 浅沟槽隔离

中图分类号: TN43

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201906.1107

Leakage current model of Total Ionizing Dose effect in ultra deep submicron SOI MOSFET devices

XI Shanxue^{1,2,3}, ZHENG Qiwen^{1,2}, CUI Jiangwei^{1,2}, WEI Ying^{1,2}, YAO Shuai^{1,2,3},
HE Chengfa^{1,2}, GUO Qi^{1,2}, LU Wu^{*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)

Abstract: The total dose radiation effect will lead to the shifting of threshold voltage and increasing of leakage current of Silicon-On-Insulator Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistors(SOI MOSFET) device. The increase of leakage current of Shallow Trench Isolation(STI) is the main factor of device degradation, which will form parasitic transistors from drain to source. In order to study the total dose radiation degradation characteristics of 130 nm Partially Depleted(PD) SOI MOSFET device, a Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis(SPICE) model including total dose radiation effect is established by using Verilog-A language. Based on the BSIM SOI standard process model, the SPICE model of STI edge leakage current is added, and the variation of equivalent gate width and gate oxygen thickness caused by radiation trap charge is considered. By comparing with the degradation characteristics of devices with different aspect ratios under different leakage voltages, the model can accurately reflect the changes of current characteristics before and after radiation, and provide a reference for radiation resistance design of devices.

Keywords: Total Irradiation Dose(TID); Silicon-On-Insulator; model; Shallow Trench Isolation

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的各种宇宙射线的影响, 产生各种辐射效应^[1]。绝缘体上硅(SOI)技术由于实现了完全的介质隔离, 寄生电容大大减小, 具有抗单粒子效应、瞬态效应等优势, 非常适用于低功耗抗辐射电路。由于浅沟槽隔离(STI)^[2]的高

收稿日期: 2018-08-27; 修回日期: 2018-10-26

基金项目: 中科院西部之光资助项目(2015-XBQN-B-15; 2017-XBQNXZ-B-008); 国家自然科学基金项目(U1532261; 11605282; 11505282; 11605283)

*通信作者: 陆妩 email:luwu@ms.xjb.ac.cn

集成度、高增益,其被广泛用于半导体器件,成为现代亚微米互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)技术中的主流隔离方案。虽然 STI 比其他类型的隔离有更多优点,但 STI 导致的总剂量辐射损伤依然存在^[3]。实际工艺中,正栅会有部分延伸至 STI,这部分延伸的栅会因边缘效应在 MOS 器件中产生一个从漏端到源端的寄生电流^[4],有许多研究把 SOI 体区 STI 氧化层延伸的正栅构成的寄生结构视为寄生晶体管^[5]。研究表明,总剂量(TID)效应成为影响 SOI MOSFET 器件 STI 区域泄漏电流产生的主要因素,对器件性能退化机理的相关分析仍然是当今的研究热点。基于 SOI MOSFET 器件的 SPICE 模型,可以通过仿真手段来预测器件电学参数的变化,从而提前估算器件及相关集成电路的寿命。实际上,SPICE 模型是工艺代工厂和电路设计者之间的桥梁,通常使用 SPICE 仿真器来仿真 IC 电路中的辐射效应。但已有的 SPICE 器件模型中的伯克利短沟道绝缘栅场效应晶体管(Berkeley Short-channel IGFET Model, BSIM)SOI 标准工艺模型没有考虑辐射效应,迫切需要一种能够考虑 TID 效应、计算精确且高效的 SOI MOSFET 器件 SPICE 模型。

有文献提出亚微米 SOI MOSFET 器件模型,考虑了“鸟嘴”硅局部氧化(Local Oxidation of Silicon, LOCOS)边缘中辐射引起的侧壁静态泄漏电流^[6]。文献[7]详细介绍了一种基于表面电势的 SOI MOSFET 器件模型,考虑了器件的 TID 和老化效应。TID 引起 STI 寄生晶体管电流特性变化的 SPICE 模型仍然是当今研究的热点。本文相对于之前建立的晶体管总剂量模型^[6-9],基于国产 130 nm PD SOI NMOSFET 工艺,在商用 BSIM SOI 模型基础上,嵌入了 STI 寄生晶体管模型,针对 TID 引起的 STI 寄生晶体管泄漏电流特性,建立了包含 TID 效应的 SOI MOSFET 器件模型。最后通过对比高低漏压偏置下的仿真结果与测试结果来验证该模型的准确性。该模型可以利用 HSPICE 仿真器进行仿真,可为 SOI MOSFET 器件的抗辐射效应设计提供参考依据。

1 STI 寄生晶体管泄漏电流模型

PD SOI NMOSFET 器件的 STI 寄生管总剂量效应电流特性是建立 STI 寄生晶体管泄漏电流 SPICE 模型的前提,图 1(a)是 STI 寄生晶体管的俯视图,通过在 STI 上添加多晶硅栅极使 STI 寄生晶体管的电流特性曲线测试成为可能。SOI 中延伸的前栅 STI 体区构成在主晶体管两侧的 STI 寄生晶体管,其截面图如图 1(b)所示^[10]。

本文的 PD SOI NMOSFET 器件背栅总剂量实验中,辐照至 300 krad,在埋氧层中产生的泄漏电流可以忽略,而且 PD SOI NMOSFET 器件的总剂量效应没有背栅晶体管和前栅晶体管的耦合效应^[11],因此整个 PD SOI NMOSFET 器件的总剂量电流特性可以由正栅晶体管、STI 寄生晶体管和背栅晶体管组成。对于 130 nm PD SOI 商用工艺,正栅和背栅晶体管的总剂量辐射漏影响较小,而 STI 寄生晶体管的总剂量辐射漏电是 PD SOI NMOSFET 晶体管总剂量辐射效应关态漏电流产生的主要因素。辐射导致 STI 内引入大量氧化物陷阱电荷,导致 STI 寄生晶体管的阈值电压减小;当剂量达到一定程度之后,阈值电压将达到饱和,不会继续负向偏移^[12],这是由于氧化层内的氧化物陷阱正电荷达到饱和的原因。文中引入辐射效应的漂移阈值电压 ΔU_{th} ,辐射之前的晶体管电压为 U_{th0} ,得到完整的 STI 寄生晶体管阈值电压 $U_{th}=U_{th0}-\Delta U_{th}$ 。

根据 SPICE 器件模型中“BSIMSOI 4.3.1 标准工艺模型手册”^[13],得到 PD SOI NMOSFET 晶体管电流方程:

$$I_{ds} = \mu C_{ox} \frac{W}{L} U_{gst,eff} \left[1 - \frac{A_{bulk} U_{ds,eff}}{2(U_{gst,eff} + 2U_t)} \right] U_{ds,eff} \quad (1)$$

式中: μ 为载流子迁移率; C_{ox} 为氧化层电容; W 为晶体管栅宽; L 为晶体管栅长; $U_{gst,eff}$ 与 $U_{ds,eff}$ 分别为有效正栅电压与有效漏电压; A_{bulk} 为体电荷因子; U_t 为热电压;

辐照在 STI 区氧化层产生的大量固定正电荷引起衬底载流子反型,因而寄生管沟道载流子浓度与 STI 区氧化层内固定正电荷的浓度和距离衬底的距离密切相关。根据图 2 中 STI 区氧化层内电场分布所示,从栅格覆盖到衬底的正向电场会在辐照的过程中将固定正电荷大量地推向 STI 衬底的界面处,造成在界面处大量的固定正电荷聚集,而远离界面处的正电荷浓度很小;加上距离界面又远,因而对衬底反型的贡献较小,所以衬底载流子的反型主要由 STI 区氧化层内靠近界面的一层高浓度正电荷群所主导,因而辐照引起的寄生管阈值漂移与这部分正电荷群到界面的距离密切相关,这个距离类似于晶体管中栅氧厚度,因此定义这部分正电荷群到界面的平均距离为寄生晶体

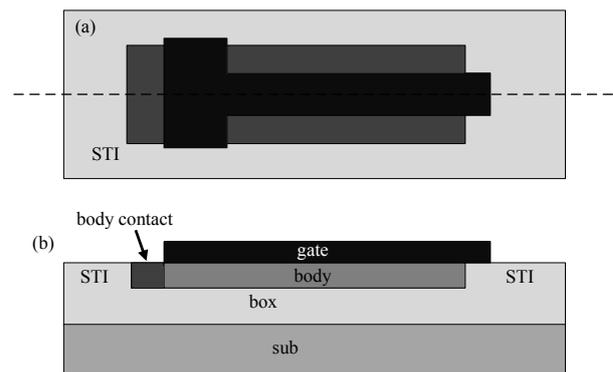


Fig. 1 Top view(a) and cross-sectional view (b) of T-type gate SOI MOSFETs
图 1 T 型栅 SOI MOSFETs 的俯视图(a)与截面图(b)

管的栅氧厚度 $T_{ox,STI}^{[14]}$ 。

如图 2 所示,定义沿 X 轴延伸的部分为寄生晶体管有效栅宽 W_{STI} 。随着剂量的增大,STI 寄生管的有效栅宽也不断沿 X 轴正方向增大。通过方程,可以将辐照剂量对 SOI 器件的影响通过寄生晶体管的阈值漂移、栅宽与栅氧的等效厚度变化来有效模拟总剂量导致的 SOI 泄漏电流的变化。STI 寄生晶体管电流可以表示为:

$$I_{ds,STI} = \mu C_{ox,STI} \frac{W_{STI}}{L} U_{gst,eff} \left[1 - \frac{A_{bulk} U_{ds,eff}}{2(U_{gst,eff} + 2U_t)} \right] U_{ds,eff} \quad (2)$$

$$C_{ox,STI} = \frac{\epsilon_o \epsilon_{ox}}{T_{ox,STI}} \quad (3)$$

式中: ϵ_o 为真空介电常数; ϵ_{ox} 为氧化物相对介电常数;。

如表 1 和图 3 所示,利用该模型对高低漏压偏置的仿真结果可以看出,随总剂量的增加,阈值电压 U_{th} 发生负漂,在 300 krad(Si)剂量点接近饱和^[12],STI 等效寄生栅宽 W_{STI} 和氧化层厚度 $T_{ox,STI}$ 均增加,符合实验结果和 PD SOI NMOSFET 器件总剂量效应机理。该泄漏电流模型能够充分反映 PD SOI NMOSFET 器件 STI 寄生晶体管的总剂量效应电流特性。

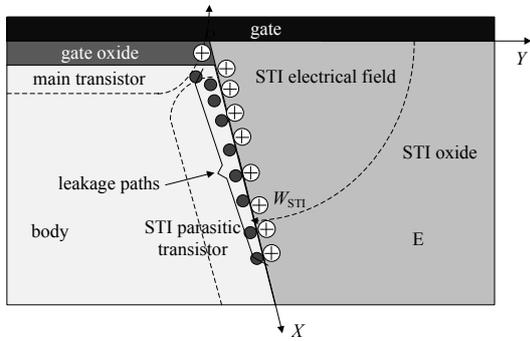


Fig.2 Sectional view of the STI parasitic transistor
图 2 STI 寄生晶体管截面图

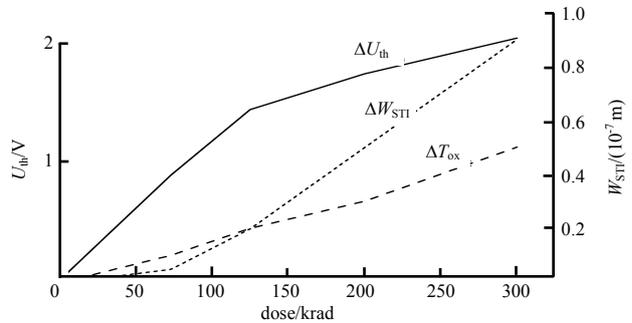


Fig.3 Threshold voltage, gate width and oxide layer thickness of STI parasitic transistor changing with dose
图 3 STI 寄生晶体管阈值电压、栅宽、氧化层厚度随剂量变化

表 1 实验和模型对照时模型采用的参数

Table1 Parameters used in model comparison with experiment

	0 krad/Si	30 krad/Si	73 krad/Si	125 krad/Si	200 krad/Si	300 krad/Si
U_{th}/V	0.66	0.37	-0.15	-0.70	-1.00	-1.30
W_{STI}/m	2.7×10^{-3}	3×10^{-8}	3.3×10^{-8}	5×10^{-8}	8×10^{-8}	1.2×10^{-7}
$T_{ox,STI}/m$	1×10^{-10}	4×10^{-9}	1×10^{-8}	2×10^{-8}	3×10^{-8}	5×10^{-8}

最后,总的 PD SOI NMOSFET 器件漏电流为:

$$I_{ds} = I_{ds,main} + I_{ds,STI} \quad (4)$$

式中 $I_{ds,main}$ 为 PD SOI NMOSFET 器件辐照前主晶体管电流特性,由商用器件 BSIM SOI 模型得到。将 STI 寄生晶体管泄漏电流模型嵌入主晶体管模型中,最终通过 HSPICE 仿真器件的总剂量辐射效应电流特性。

2 模型验证

为验证 PD SOI MOSFET 器件模型,进行了总剂量辐照测试实验。总剂量测试采用 130 nm SOI 工艺、T 栅 PD SOI NMOSFET 器件,宽长比 $W/L = 10 \mu m / 10 \mu m, 10 \mu m / 0.35 \mu m$;辐射源采用中国科学院新疆理化技术研究所的 ^{60}Co 源,辐照器件采用最恶劣的 ON 偏置($U_g = 3.3 V, U_{ds} = U_s = U_b = U_{sub} = GND$),取 5 个剂量点,分别为 30,73,125,200,300 krad(Si),辐射后用 Keithley 4200 分别测试 $U_{ds} = 0.05 V$ 和 $3.3 V$ 偏置下的 $I_d - U_g$ 特性曲线,与辐射前的数据进行对比。最终得到 $10 \mu m / 10 \mu m$ 尺寸 PD SOI NMOSFET 晶体管总剂量辐

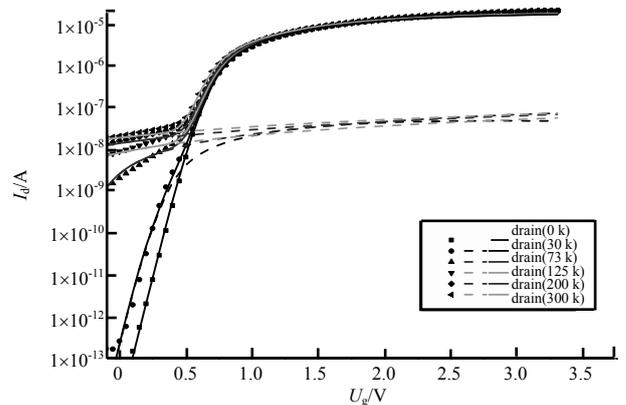


Fig.4 Comparison of simulation results of model and radiation results
图 4 $10 \mu m / 10 \mu m$ 模型仿真结果与辐射结果对比(U_{ds} 为 $0.05 V$)

射效应电流模型的 HSPICE 仿真结果,如图 4 和图 5 所示(图中:点表示实验实测数据;虚线表示 STI 寄生晶体管仿真结果;实线表示将 STI 寄生晶体管泄漏电流模型嵌入主晶体管模型后的 HSPICE 仿真结果)。阈值电压随着剂量的增加负向偏移,在 300 krad(Si)剂量点接近饱和^[12]。可以看出,针对高低漏端电压偏置,不同总剂量辐射后的关态漏电流仿真和辐照测试结果都表现出高度吻合,说明该 STI 寄生晶体管泄漏电流模型能够充分反映 PD SOI NMOSFET 器件 STI 寄生晶体管的总剂量效应电流特性。图 6 为 10 $\mu\text{m}/0.35 \mu\text{m}$ 尺寸器件的仿真与测试数据结果,可以看出,器件关态漏电流仿真和辐照测试结果都表现出高度吻合,即通过改变栅长特性,可以进一步验证该模型的准确性。

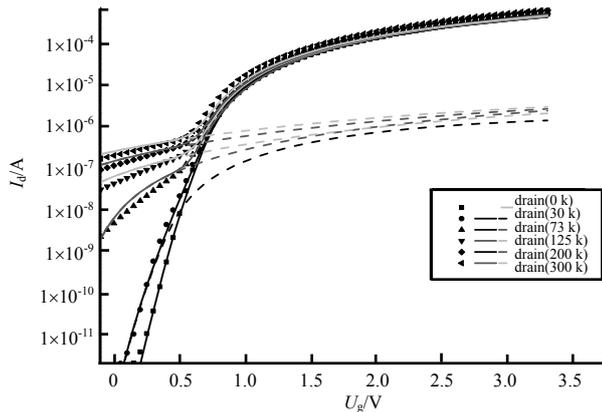


Fig.5 Comparison of simulation results of model and radiation results
图 5 10 $\mu\text{m}/10 \mu\text{m}$ 模型仿真结果与辐照结果对比(U_{ds} 为 3.3 V)

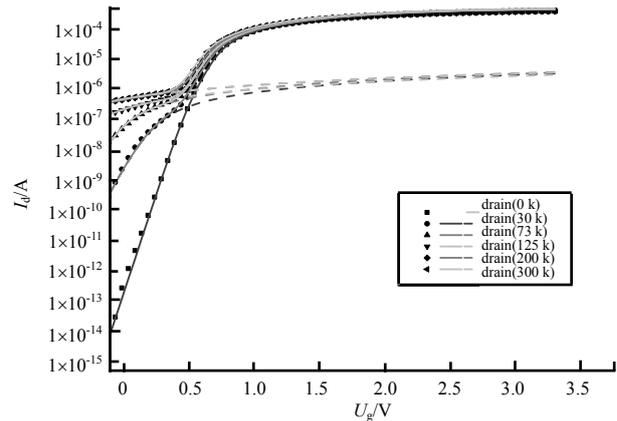


Fig.6 Comparison of simulation and radiation results of total dose model
图 6 10 $\mu\text{m}/0.35 \mu\text{m}$ 总剂量模型仿真结果与辐照结果对比(U_{ds} 为 0.05 V)

3 结论

在深入分析 SOI 器件总剂量辐射效应机理基础上,针对国产 130 nm PD SOI NMOSFET 器件的辐射损伤特性,通过在主晶体管模型中嵌入 STI 寄生晶体管泄漏电流模型,并考虑总剂量效应引起 STI 寄生晶体管电流特性的变化,将辐照剂量对 SOI 器件的影响通过寄生晶体管的阈值漂移、栅宽与栅氧的等效厚度变化来有效模拟总剂量导致的 PD SOI NMOS 器件泄漏电流的变化,建立了包含总剂量效应的 PD SOI NMOSFET 器件模型。利用 HSPICE 仿真器,计算了不同宽长比的 PD SOI NMOSFET 器件的漏电流随总剂量变化的仿真结果,通过与实验测试结果对比,仿真结果准确地反映出器件辐射前后的电学特性变化。模型仿真结果与实验测试结果吻合度高,适用于超深亚微米 PD SOI NMOSFET 器件,对其辐射电学特性的退化可以有效预测与评估,减少抗辐射电路开发周期与总剂量辐照测试成本。

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] 谢儒彬,吴建伟,陈海波,等. STI 场区加固 NMOS 器件总剂量效应[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(5):805–810. (XIE Rubin,WU Jianwei,CHEN Haibo,et al. STI field strengthening NMOS device total dose effect[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(5):805–810.)
- [3] ZEBREV G I,GORBUNOV M S. Modeling of radiation-induced leakage and low dose-rate effects in thick edge isolation of modern MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009,56(4):2230–2236.
- [4] BRYANT A,HAENSCH W,GEISSLER S,et al. The current-carrying corner inherent to trench isolation[J]. IEEE Electron Device Letters, 1993,14(8):412–414.
- [5] KHANDELWAL S,AGARWAL H,DUARTE J P,et al. Modeling STI edge parasitic current for accurate circuit simulations[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2015,34(8):1291–1294.
- [6] ZEBREV G I,GORBUNOV M S. Modeling of radiation-induced leakage and low dose-rate effects in thick edge isolation of modern MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009,56(4):2230–2236.
- [7] ESQUEDA I S,BARNABY H J,KING M P. Compact modeling of total ionizing dose and aging effects in MOS technologies[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2015,62(4):1501–1515.

- [8] 杨变霞. NMOS 晶体管的总剂量辐射效应仿真[J]. 固体电子学研究与进展, 2015(2):187-190. (YANG Bianxia. Total dose radiation effect simulation of NMOS transistors[J]. Solid State Electronics Research and Progress, 2015(2):187-190.)
- [9] MADAN A, VERMA R, ARORA R, et al. The enhanced role of shallow-trench isolation in ionizing radiation damage of 65 nm RF-CMOS on SOI[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, 56(6):3256-3261.
- [10] CHAO P, HU Z, ZHANG Z, et al. A new method for extracting the radiation induced trapped charge density along the STI sidewall in the PDSOI NMOSFETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(6):4697-4704.
- [11] HUANG Jianqiang, HE Weiwei, CHEN Jing, et al. New method of total ionizing dose compact modeling in partially depleted Silicon-On-Insulator MOSFETs[J]. Chinese Physics Letters, 2016, 33(9):82-85.
- [12] ZHENG Qiwen, YU Xuefeng, CUI Jiangwei, et al. Degradation of the front and back channels in a deep submicron partially depleted SOI NMOSFET under off-state stress[J]. Journal of Semiconductors, 2013, 34(7):074008.
- [13] YANG Wenwei, LIN Chung-Hsun, MORSHED Tanvir Hasan, et al. BSIMSOI 4.3.1 MOSFET Model of Users' Manual[Z]. 2010.
- [14] 刘文, 王思浩, 黄如. 深亚微米 NMOS 器件总剂量辐照引起的寄生管泄漏电流模型[C]// 第十六届全国半导体集成电路硅材料学术会议. 杭州:[s.n.], 2010:1-4. (LIU Wen, WANG Sihao, HUANG Ru. Model of parasitic tube leakage current caused by total dose irradiation of deep submicron NMOS devices[C]// 16th National Semiconductor Integrated Circuit Silicon Materials Conference. Hangzhou, Zhejiang, China:[s.n.], 2010:1-4.)

作者简介:



席善学(1993-), 男, 山东省滕州市人, 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: xishanxue@yeah.net.

郑齐文(1987-), 男, 山东省济宁市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为大规模集成电路测试、辐射效应、可靠性.

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

魏莹(1983-), 女, 乌鲁木齐市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为半导体材料和器件的辐射效应与可靠性.

姚帅(1992-), 男, 河北省廊坊市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为空间综合辐射环境下电子元器件辐射效应.

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.

何承发(1965-), 男, 乌鲁木齐市人, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为辐射剂量学及其应用.

陆妩(1962-), 女, 乌鲁木齐市人, 研究员, 博士生导师, 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.