

超深亚微米器件总剂量辐射效应三维数值模拟*

何宝平[†] 丁李利 姚志斌 肖志刚 黄绍燕 王祖军

(西北核技术研究所, 西安 710613)

(2010年6月9日收到; 2010年8月12日收到修改稿)

本文分析了浅槽隔离(STI)结构辐射诱导电荷的分布情况,给出一种模拟超深亚微米器件总剂量辐射效应的新方法. 研究表明,如果在栅附近沿着STI侧墙不加辐照缺陷,仿真出的 $0.18\ \mu\text{m}$ 超深亚微米晶体管亚阈区 $I-V$ 特性没有反常的隆起,并且能够很好地反映试验结果. 在研究总剂量辐照特性改善方面,在剂量不是很大的情况下,采用超陡倒掺杂相对于均匀掺杂能有效地减小辐照所引起的泄漏电流. 如果采用峰值(Halo)掺杂,不仅有利于提高超深亚微米器件的抗辐照能力,而且在大剂量的情况下,可以得到明显的效果.

关键词: 总剂量, 超陡倒掺杂, Halo 掺杂, 辐射效应

PACS: 61.80.Ed, 61.80.Jh, 81.40.Ba, 73.40.Qv

1. 引言

随着集成电路特征尺寸缩小至超深亚微米尺度,为了抑制抑制短沟效应、强场效应等,采用新型氮硅超薄栅技术、浅结技术、逆向掺杂、Halo 结构 STI 隔离结构等新工艺技术^[1],这些新工艺技术的采用将可能给器件和电路的辐射损伤以及在空间环境中的应用带来新的影响,这也是目前国际上抗辐射加固领域研究的热点^[2-4]. 国内这方面研究整体处于起步阶段,有关总剂量辐射效应,早先关于常规金属氧化物半导体(MOS)器件的研究显示^[5,6],总剂量辐射损伤的主要原因是辐射诱导栅氧化层电荷的积累造成的. 目前针对超深亚微米 MOS 器件辐照效应研究,关注的重点是 STI 隔离区^[7-9]. 本文从理论角度详细地分析了超深亚微米器件总剂量辐射 STI 隔离结构诱导电荷分布情况,研究了超深亚微米器件总剂量辐射效应的仿真方法. 针对均匀掺杂的辐照退化特性机理,详细地研究了超陡倒掺杂和 Halo 掺杂器件辐照性能的退化程度,分析了两种掺杂技术对器件的辐照特性的影响.

2. 器件结构和建模方法

图 1 是利用 MESH 软件构建的用于模拟中芯

国际(SMIC) $0.18\ \mu\text{m}$ n 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管(NMOSFET)三维结构图,从不同部位的灰度可以粗略判断出各部分掺杂浓度的大小. 图 2 是垂直于 X 轴方向对应的剖面图,器件结构详细的参数和掺杂信息见表 1. 在模拟总剂量辐照对器件的损伤过程,考虑在 STI 隔离中添加非均匀电荷分布来拟合 STI 中氧化层陷阱电荷与界面态陷阱的影响,辐照过程中的缺陷积累和退火过程的缺陷恢复由以下公式给出^[3].

辐照过程中的缺陷积累

$$p_r(t) = \frac{gk_1N_t}{gk_1 + k_2}(1 - e^{-(gk_1+k_2)t})$$

$$= \frac{gk_1N_t}{gk_1 + k_{20}e^{-\beta\phi}}(1 - e^{-(gk_1+k_{20}e^{-\beta\phi})t}). \quad (1)$$

退火过程中的缺陷恢复

$$p_a(t) = p_r(t_r)e^{-k_2(t-t_r)}$$

$$= p_r(t_r)e^{-k_{20}e^{-\beta\phi}(t-t_r)}. \quad (2)$$

式中, g 代表辐照剂量率, k_1, k_2 分别代表空穴俘获率常数和退火率常数. k_{20} 是逃逸频率, β 是和势垒高度有关的隧道参数. N_t 代表空穴陷阱密度,文献给出的范围^[10]是 $1 \times 10^{17} - 1 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$,本文选择 N_t 为 $3 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$. 运用 DESSIS 三维器件仿真程序模拟了 SMIC $0.18\ \mu\text{m}$ 工艺晶体管的总剂量辐照效应. 通过比较 $I-V$ 曲线的仿真和试验结果,对在模拟

* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号:61354030101)资助的课题.

[†] E-mail: baopinghe@126.com

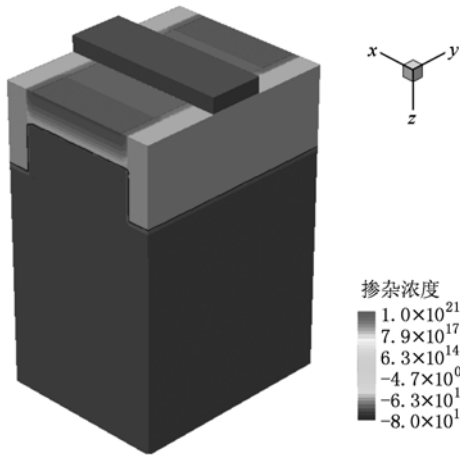


图1 0.18 μm NMOS 三维结构图

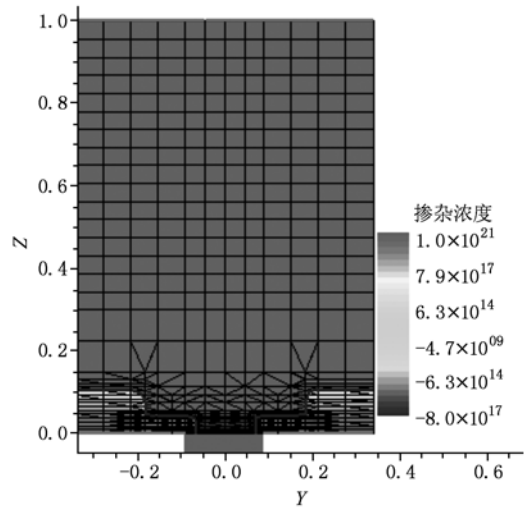


图2 垂直于 X 轴(X=0)方向对应的剖面图

中使用的模型参数进行了确认,得到参数 k_1, k_{20}, β 分别为 $1.1 \times 10^{-5} \text{ rad}^{-1}, 4.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 2.2 nm^{-1} . χ 代表小区域中心与界面间的距离, t_r 代表辐照的总时间. 图 3(a), (b) 分别给出了不同总剂量辐照

下, 0.18 μm NMOSFET 亚阈 I_d-V_g 曲线的试验和理论仿真结果.

表1 仿真用器件的结构参数与掺杂信息

沟道长度/μm	沟道宽度/μm	沟道深度/μm	源漏长度/μm	源漏结深/μm
0.18	0.35	0.04	0.15	0.12
STI 宽度/μm	STI 深度/μm	衬底厚度/μm	栅氧化层厚度/nm	源漏轻掺杂(LDD)区深度/μm
0.1	0.3	1	3.2	0.05
LDD 区长度/μm	衬底掺杂/cm ⁻³	LDD 区掺杂/cm ⁻³	源漏掺杂/cm ⁻³	
0.1	5×10^{16}	2×10^{19}	1×10^{20}	

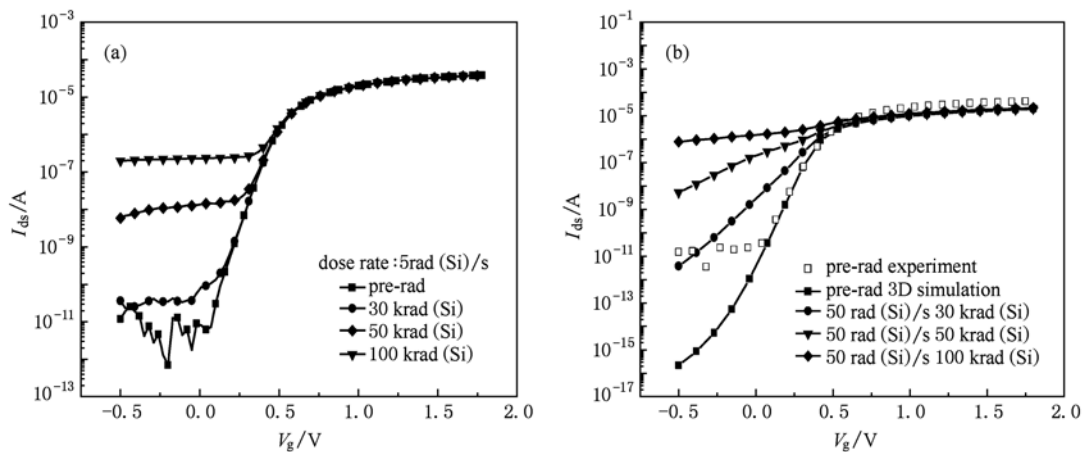


图3 不同总剂量辐照下, 0.18 μm NMOSFET 的 I_d-V_g 特性曲线 (a) 试验结果; (b) 仿真结果

从图 3(a) 的试验结果可以看出, $I-V$ 特性曲线随剂量的平移或延伸很小, 表明可以忽略薄栅氧化

层中氧化物陷阱电荷的积累和界面态, STI 场氧区的漏电将取代阈值电压的漂移而成为超深亚微米

器件辐照失效的主要模式. 因此, 在仿真总剂量辐照对器件的损伤过程中, 我们忽略栅氧化层缺陷的影响, 重点考虑 STI 场氧区辐照缺陷对器件特性的影响, 在距离界面处 5 nm 尺度范围内整个 STI 高度添加辐照缺陷, 仿真结果如图 3(b) 所示. 从图中看出, 随着辐照剂量的增加, 除了 STI 场氧区漏电外, 氧化层陷阱电荷引起的阈值电压漂移会有一个急剧明显的增长, 导致亚阈区 $I-V$ 特性的反常隆起. 因此, 这种仿真方法不能正确反映试验结果, 需深入分析原因和完善模型.

3. 模型的改进

为了弄清楚仿真结果和试验结果的差别, 我们在器件 STI 隔离去加入辐照缺陷, 模拟了低栅偏压下器件电流密度的三维分布. 研究发现, 栅偏压为 0

伏时的漏电流是在栅附近沿着 STI 侧墙在流动(图 4(a) 所示), 而对更低的栅偏压情况, 主要的漏电通道出现在 STI 侧墙的较深处(图 4(b) 所示), 这意味着对更负的栅偏压, STI 侧墙顶处的电荷没有发生作用, 寄生漏电通道主要发生在较深的体区. 在正的栅偏压下, STI 侧墙电荷由于受到垂直电场的作用而向下移动, 而导致在侧墙顶处几乎没有留下辐照缺陷电荷.

为了在仿真模型中反映以上这种现象, 我们在 STI 中调整了加辐照缺陷的方式. 在栅附近沿着 STI 侧墙加入很少或不加缺陷. 研究表明, 在距离 STI 侧墙顶处 100 nm 以下的范围加入辐照缺陷, 仿真出的亚阈区 $I-V$ 特性没有反常的隆起, 从效应规律上能够很好地反映试验结果(如图 5 所示). 图 6 给出了均匀掺杂下不同总剂量辐照下, 仿真的结果和试验结果, 从图中看出二者符合得比较好(如图 6 所示).

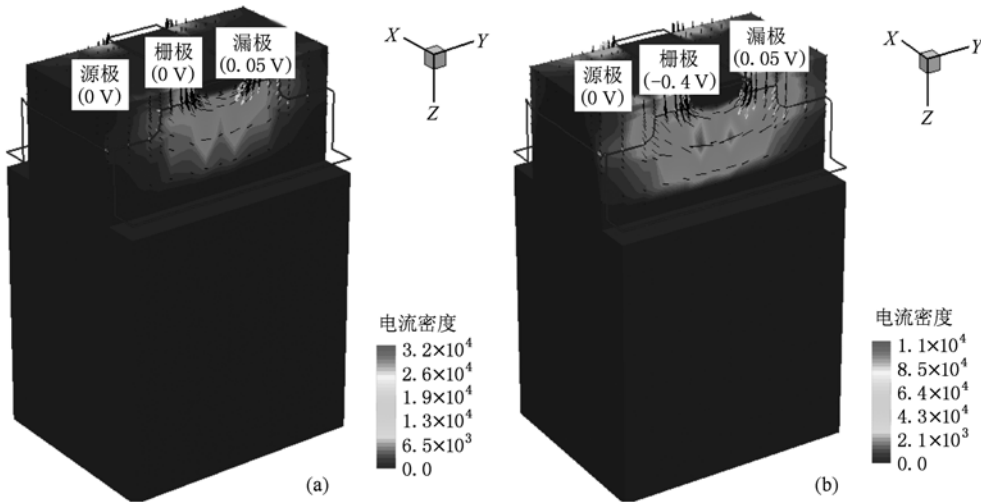


图 4 0.18 μm STI-NMOSFET 电流密度分布仿真结果 (a) 栅偏压 $V_g = 0 \text{ V}$; (b) 栅偏压 $V_g = -0.4 \text{ V}$

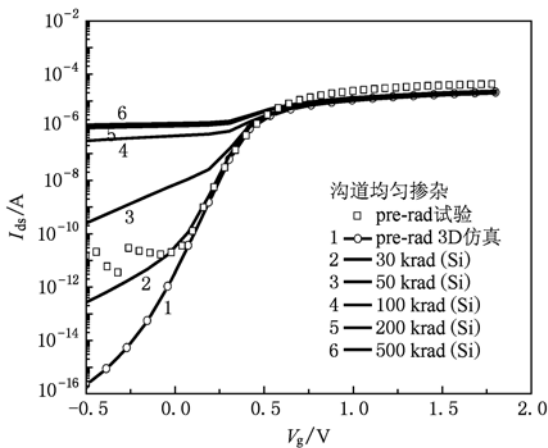


图 5 0.18 μm NMOSFET 3D 总剂量辐照仿真结果

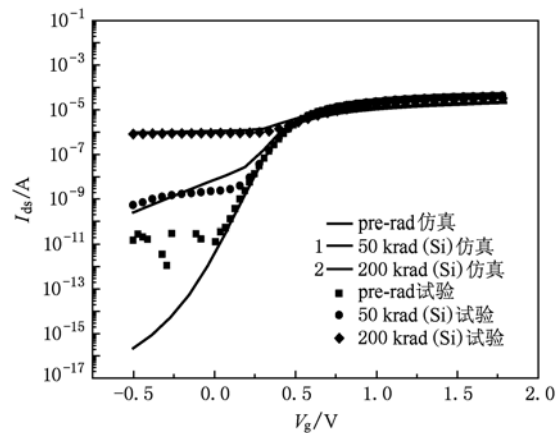


图 6 0.18 μm NMOSFET 仿真与试验结果比较

图 7 给出了辐照剂量为 200 krad(Si) 时, 均匀掺杂情况下, 关态和开态下电子密度的分布图. 关态时, 栅压为 0 V, 源接地, 衬底接 0 V, 漏压接 1.8 V; 开态时, 栅接 1.8 V, 漏压接 1.8 V, 源接地, 衬底接 0 V. 从图中可以看出, 器件处于

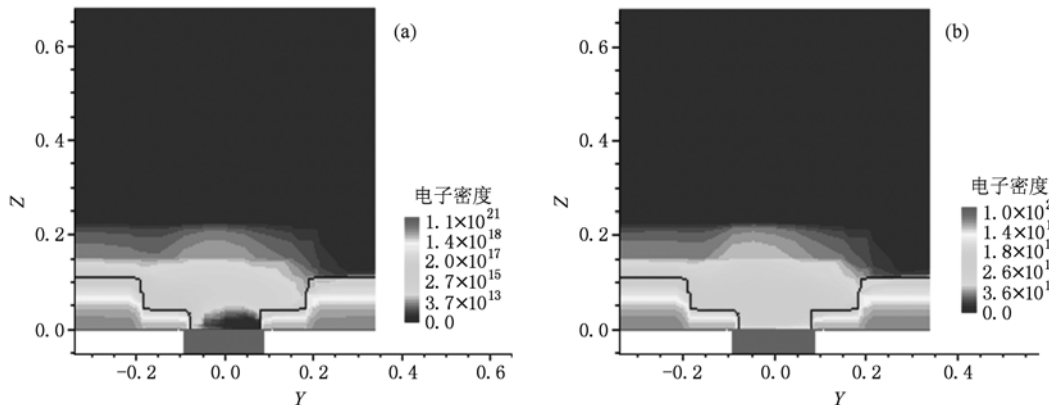


图 7 沟道采用均匀掺杂电子密度分布图 (a) 关态; (b) 开态

4. 超陡倒掺杂条件下器件抗辐射性能的改善

超陡倒掺杂是指沟道区横向掺杂浓度均匀, 而纵向掺杂分布不均匀. 超陡倒掺杂的表面为低掺杂浓度层, 表面下为一个高浓度的埋层. 通过超陡倒掺杂可以获得表面的高迁移率, 从而提高驱动电流, 而且由于高的埋层浓度, 抑制了漏感应势垒降低 (DIBL) 效应, 减小了器件的泄漏电流.

图 8 给出了均匀掺杂和超陡倒掺杂器件辐照前以及累积辐照剂量为 30 krad, 50 krad, 100 krad(Si) 以及 200 krad(Si) 下的转移特性曲线. 从图中可以看出, 总剂量辐照能使器件的泄漏电流显著增加. 这主要是因为随着辐照剂量的增大, STI 氧化层中缺陷累积的数量增多, 引起侧面感生的电子密度增加, 从而导致泄漏电流的增加. 从图中还可以看到, 在辐照前, 均匀掺杂和超陡倒掺杂分布的泄漏电流在关态时处于同一个量级. 而在辐照开始之后, 两者在关态时的泄漏电流存在明显的差异. 在剂量分别为 30 krad(Si) 和 50 krad(Si) 时, 超陡倒掺杂分布的泄漏电流要比均匀掺杂小 2 个量级左右. 而在剂量到大于 200 krad 时, 这种差异又明显减小. 因此, 在剂量不是很大的情况下, 超陡倒掺杂相对于均匀掺杂能有效地减小辐照所引起的泄漏电流.

为了分析其产生的原因, 图 9 给出了器件受到

关态时, 沟道表面没有反型, 泄漏电流主要是辐照引起的寄生晶体管的作用所导致的, 漏电流的类型为侧面泄漏电流. 器件处于开态时, 沟道表面形成反型层, 所产生的主管的电流较大, 淹没寄生管的影响.

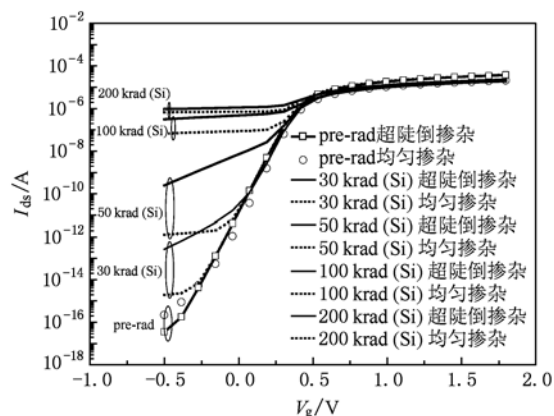


图 8 不同剂量辐照下, 超陡倒掺杂和均匀掺杂分布的 $I-V$ 曲线比较

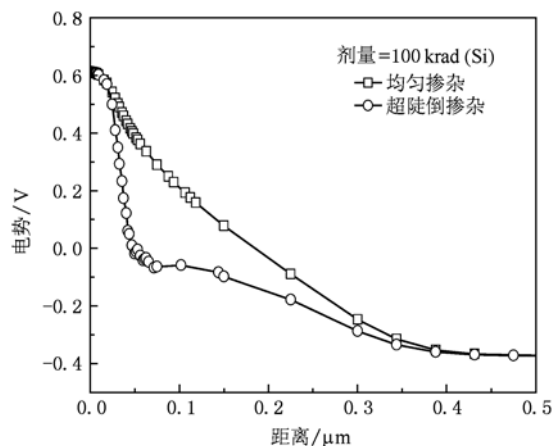


图 9 100 krad(Si) 辐照后, 均匀掺杂和超陡倒掺杂下, 垂直沟道方向电势分布图

50 krad(Si) 总剂量辐照后,均匀掺杂和超陡倒掺杂下,垂直沟道方向的电势分布图,从图中看出,该辐照剂量下,超陡倒掺杂器件在所有区域的电势都低于均匀掺杂的情况,而且从二种掺杂界面处的电子密度分布图(如图 10 所示)也可以看出,均匀掺杂

和超陡掺杂情况下的泄漏沟道由表面和体区共同组成,但超陡倒掺杂由于高浓度埋层的存在,使得泄漏通道的宽度比均匀掺杂时窄了许多.因此在该剂量下,超陡倒掺杂能更加有效抑制辐照引起的体区 DIBL 效应,从而使得泄漏电流减小.

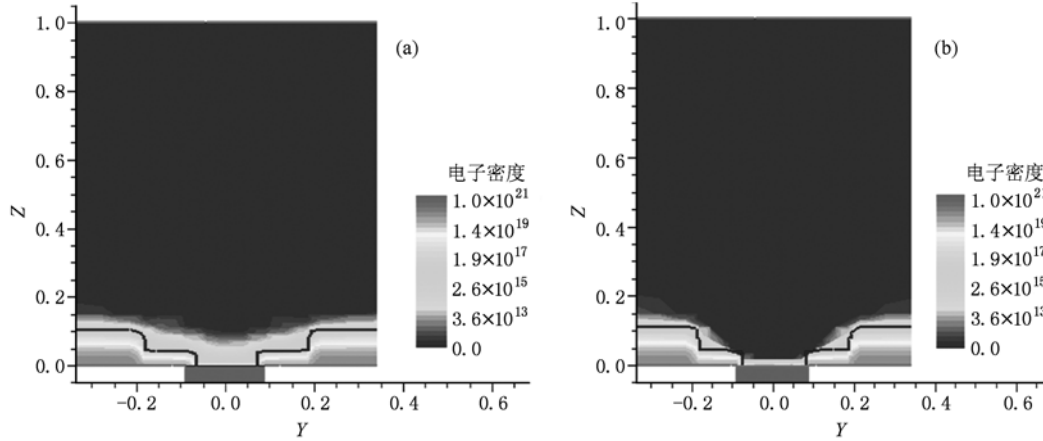


图 10 50 krad(Si) 辐照后,界面处电子密度分布图 (a)均匀掺杂,(b)超陡倒掺杂

5. Halo 掺杂条件下器件抗辐射性能改善

超陡倒掺杂分布能够在低辐照剂量情况下很好地抑制辐照引起的泄漏电流,为了进一步提高器件的抗辐照性能,考虑采用 Halo 掺杂来进行改善. Halo 掺杂相对超陡倒掺杂而言是典型的横向沟道工程,主要是利用沟道横向掺杂的非均匀性来克服短沟道效应,一般是指在沟道靠近源、漏的区域引入高掺杂区.图 11 给出了采用 Halo 掺杂后总剂量

效应的仿真结果,从图中可以看到,在器件中加入 Halo 掺杂区域之后,小剂量辐照情况下的泄漏电流要比均匀掺杂小 2 个量级左右.即使在辐照剂量达到 200 krad 时,器件的泄漏电流依然比没有 Halo 区域的时候得到了明显的降低.这是因为在器件中加入 Halo 掺杂,源漏区的电力线将终止于 Halo 区,从而抑制了由于辐照引起的器件的 DIBL 效应,这一点可以从图 12 中电势分布图得到证明.图 13 给出了 100 krad(Si) 辐照后,均匀和 Halo 掺杂下垂直沟

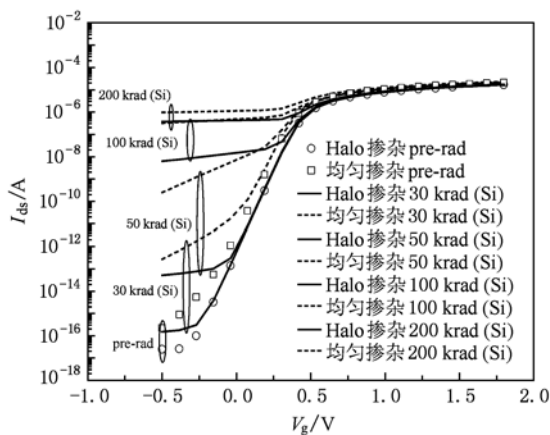


图 11 不同剂量辐照下,Halo 和均匀掺杂分布的 I_{ds} - V_g 曲线比较

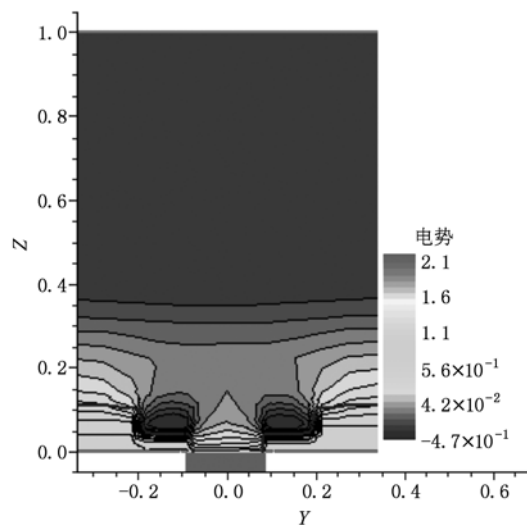


图 12 100 krad(Si) 辐照后,Halo 掺杂下的电势分布图

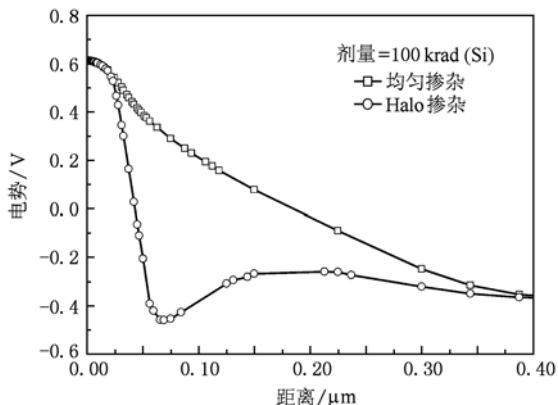


图 13 100 krad(Si) 辐照后, 均匀和 Halo 掺杂下, 垂直沟道方向的电势分布图

道方向的电势分布图, 从图中看到, Halo 掺杂在所有区域的电势都低于均匀掺杂的情况, Halo 区的引入有利于提高器件的抗辐照能力, 并且在大剂量的情况下, 可以得到很明显的效果。

6. 结 论

本文从理论仿真的角度研究了 $0.18 \mu\text{m}$ 超深亚微米晶体管的总剂量辐照效应. 研究发现, 负栅偏压下 STI 侧墙顶处的电荷没有发生效应, 而正的栅偏压下 STI 侧墙电荷由于受到垂直电场的作用而向下移动, 在侧墙顶处几乎没有留下缺陷电荷. 因此, 在仿真过程中, 我们在栅附近沿着 STI 侧墙不加辐照缺陷, 仿真出的亚阈区 $I-V$ 特性没有反常的隆起, 从效应规律上能够很好地反映试验结果. 另外, 在研究总剂量辐照特性改善方面, 如果在剂量不是很大的情况下, 超陡倒掺杂相对于均匀掺杂能有效地减小辐照所引起的泄漏电流, 但是当剂量大于 $200\text{krad}(\text{Si})$ 时这种改善作用不明显. 而在横向上如果采用 Halo 掺杂, 不仅有利于提高器件的抗辐照能力, 而且在大剂量的情况下, 可以得到很明显的效果。

- [1] Steven C W, Ronald C L, Jon V O, John M H, Steven C M 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2602
- [2] Paillet P, Gaillardin M, Ferlet-Cavois V 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2413
- [3] Simoen E, Rafi J M, Mercha A, Cleays C 2004 *Solid-state Electronics* **48** 1045
- [4] Anelli G, Campbell M, Delmastro M, Faccio F, Florian S, Giraldo A, Heijne E, Jarron P, Kloukinas K, Marchioro A, Moreira P, Snoeys W 1999 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46** 1690
- [5] He B P, Wang G Z, Zhou H, Gong J C, Luo Y H, Jiang J H 2003 *Acta. Phys. Sin.* **52** 188 (in Chinese) [何宝平、王桂珍、周辉、龚建成、罗尹虹、姜景和 2003 物理学报 **52** 188]
- [6] He B P, Yao Z B, 2010 *Acta phys. Sin.* **59** 1985 (in Chinese)

- [何宝平、姚志斌 2010 物理学报 **59** 1985]
- [7] Wang S H, Lu Q, Wang W H 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 1970 (in Chinese) [王思浩、鲁庆、王文华等 2010 物理学报 **59** 1970]
- [8] Lir M, Du L, Zhuang Y Q, Bao J L, 2007 *Acta. Phys. Sin.* **56** 3400 (in Chinese) [李瑞珉、杜磊、庄奕琪、包军林 2007 物理学报 **56** 3400]
- [9] Peng S Q, Du L, Zhuang Q Y, Bao J L, HE L, CHEN W H 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 5205 (in Chinese) [彭绍泉、杜磊、庄奕琪、包军林、何亮、陈伟华 2008 物理学报 **57** 5205]
- [10] Ivan Sanchez Esqueda, Hugh J. Barnaby, Michael L. Alles 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2259

Three-dimensional simulation of total dose effects on ultra-deep submicron devices^{*}

He Bao-Ping[†] Ding Li-Li Yao Zhi-Bin Xiao Zhi-Gang Huang Shao-Yan Wang Zu-Jun

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710613, China)

(Received 9 June 2010; revised manuscript received 12 August 2010)

Abstract

The radiation-induced charge distribution in shallow-trench isolation (STI) structures is analyzed in this paper. We present a new approach for modeling total dose effect of ultra-deep submicron transistors. The results show that, when there is no radiation-induced charge in top100 nm of the trench-silicon interface, the simulation results of 0.18 μm ultra-deep submicron transistors show that the I - V sub-threshold does not produce the hump, and yield good agreement with experiments. On the aspect of the improvement on total ionizing dose, the leakage current of MOSFET with delta doping can be effectively reduced than with the uniform doping profile under lower radiation dose. If the Halo doping is adopted in landscape orientation, the total dose of ultra-deep submicron transistors can be improved. This improvement is evident even at higher irradiation dose.

Keywords: total dose, delta doping, Halo doping, radiation effect

PACS: 61.80. Ed, 61.80. Jh, 81.40. Ba, 73.40. Qv

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 61354030101).

[†] E-mail: baopinghe@126.com