

三维 H 形栅 SOI NMOS 器件总剂量条件下的单粒子效应*

卓青青[†] 刘红侠 王志

(西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2013 年 3 月 24 日收到; 2013 年 5 月 28 日收到修改稿)

本文通过数值模拟研究了 H 形栅 SOI NMOS 器件在总剂量条件下的单粒子效应. 首先通过分析仿真程序中影响迁移率的物理模型, 发现通过修改了的由于表面散射造成迁移率退化的 Lombardi 模型, 仿真的 SOI 晶体管转移特性和实测数据非常符合. 然后使用该模型, 仿真研究了处于截止态 ($V_D = 5 \text{ V}$) 的 H 形栅 SOI NMOS 器件在总剂量条件下的单粒子效应. 结果表明: 随着总剂量水平的增加, 器件在同等条件的重离子注入下, 产生的最大漏极电流脉冲只是稍有增大, 但是漏极收集电荷随总剂量水平大幅增加.

关键词: 单粒子脉冲电流, 漏极收集电荷, 总剂量效应

PACS: 61.80.Az, 02.60.Cb, 07.89.+b

DOI: 10.7498/aps.62.176106

1 引言

空间辐射带来器件和电路的性能退化和失效, 严重制约着电子产品的可靠性和寿命. 长期以来, 单粒子效应是航天应用主要面临的辐射效应之一, 国内外学者对早期发现的器件和电路的单粒子效应进行了大量深入的研究^[1,2]. 随着工艺尺寸的减小, 单粒子效应 (single event effect, SEE) 的危害日益突出, 成为国际上的研究热点^[3-6].

宇宙空间中的器件和电路, 暴露在质子或者电子的电离辐射环境中, 抗单粒子特性会受到电离总剂量效应的影响, 且结果和辐照试验时的工作状态有关. 国内外已经对总剂量条件下的电路和器件的单粒子效应进行了一系列的研究^[7,8]. SOI 器件由于隐埋氧化层的存在, 抗单粒子效应增强. 但正是由于隐埋氧化层的存在, 导致 SOI 器件的总剂量效应更加突出, 因而 SOI 器件的抗单粒子特性受其总剂量效应的影响会更明显. 进行总剂量条件下的单粒子实验, 成本非常昂贵, 实验条件更是不容易达到. 因而通过模拟仿真研究总剂量条件下器件的单

粒子效应, 在 SOI 器件抗辐照研究方面很有优势. 本文主要通过 ISE TCAD 软件模拟研究了 H 形栅 SOI NMOS 器件在总剂量条件下的单粒子效应, 对比分析了相同结构的二维和三维 SOI 器件的单粒子仿真结果. 研究了不同总剂量条件下, SOI 器件的单粒子效应. 结果表明: 随着总剂量水平的增加, SOI 器件的抗单粒子特性恶化.

2 物理模型和器件结构

图 1 是 DEVICE 工具构建的三维 H 形栅 SOI 器件结构示意图, 宽长比 $W/L = 8 \mu\text{m}/0.8 \mu\text{m}$. 为了仿真的方便, 只在 H 形栅的中间一条栅上, 进行掺杂和制作电极. 使用绝缘 SiO_2 作为隔离区材料, 并且直接和器件的埋氧层相接触. 具体的掺杂浓度和结构参数如表 1 所示.

单粒子效应模拟的重离子模型参数如表 2 所示, 其中 let-f 和 wt-hi 分别是注入重离子的线性能量传输值和半径, 而 time, direction 和 location 分别是注入的时间, 方向和位置. 其中 direction=(0, 1) 表示重离子垂直注入器件, 本文中所有的数值模

* 国家自然科学基金 (批准号: 61076097, 60936005) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 200110203110012) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zhuoqq.2006@163.com

拟都采用垂直注入. 各个参数的详细表达式参照文献 [9].

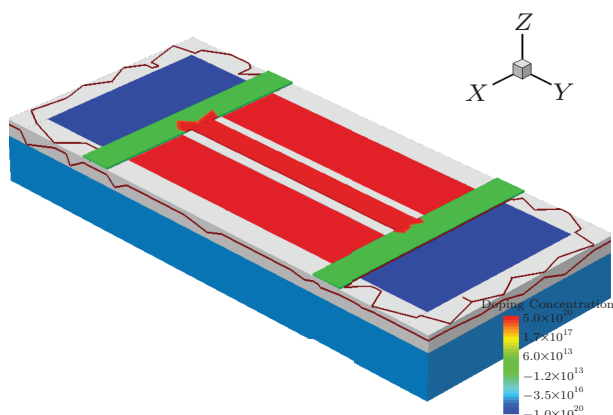


图 1 H 形栅结构 SOI 器件示意图

表 1 H 形栅 SOI 器件的结构和工艺参数

参数	数值
多晶硅厚度/ μm	0.35
栅介质厚度/ μm	0.0125
顶层硅膜厚度/ μm	0.16
埋氧层厚度/ μm	0.375
源/漏掺杂浓度/ cm^{-3}	5×10^{20}
源/漏 LDD 掺杂浓度/ cm^{-3}	1.5×10^{18}
P+ 体接触掺杂浓度/ cm^{-3}	4.5×10^{19}
体区掺杂浓度/ cm^{-3}	1.5×10^{17}

表 2 重离子的模型参数

参数	数值
$\text{let-f}/\text{pC} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	0.05
$\text{wt-hi}/\mu\text{m}$	0.05
$\text{time}/10^{-12}\text{s}$	5.0
direction	(0, 1, 0)
location	(0, 0, 0)
Length/ μm	0.15

ISE TCAD 中, 重离子注入后, 与电流连续性方程所对应的过剩载流子产生率可以和辐射的线性能量传输值 let-f 联系起来. 另外线性能量传输值 let-f 还有一个单位 $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ (入射粒子在单位长度上淀积的能量除以材料的密度), ρ 是硅的密度 ($\rho = 2.329 \text{ g/cm}^3$). 在后面的器件数值模拟, 将采用

$\text{pC}/\mu\text{m}$ 这个单位. 两者之间的关系为

$$1\text{pC}/\mu\text{m} = \frac{1 \times 10^{-12} \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C/pair}} \times \frac{3.6 \text{ eV/pair}}{\rho \times 10^3 \times 10^6} \times 10^4 = 96.608 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}. \quad (1)$$

数值模拟中采用的物理模型包括 SRH 和 Auger 复合, 迁移率随掺杂浓度和电场的变化以及禁带变窄等效应. 另外, 最重要的是在 SET 模拟中必须考虑载流子和载流子之间的散射模型对迁移率的影响.

3 数值结果分析

本文的数值模拟流程是: 首先将 H 形栅 $0.8 \mu\text{m}$ SOI NMOS 器件置于截止态, 对其进行总剂量实验, 剂量率为 $50 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 的 ^{60}Co γ 射线. 然后选取和修改器件进行仿真需要的物理模型和偏置条件, 使模拟结果和测试数据符合. 最后, 对 SOI NMOS 器件的总剂量和单粒子耦合效应进行仿真.

3.1 调整仿真程序当中的物理模型, 使模拟结果符合测试数据

仿真工具 DESSIS 程序的 Physics 部分, 迁移率模型的正确选择, 极大的影响着器件的单粒子效应仿真结果. DESSIS 中使用模块组合的方式来描述载流子的迁移率. 最简单的情况下, 迁移率是晶格温度的函数, 即是以下所描述的常数迁移率或体迁移率 (用于未掺杂硅材料). 对于掺杂之后, 载流子受到杂质的散射, 迁移率产生退化. 还有描述界面迁移率退化的模型, 例如在 MOSFET 器件中, 引入了沟道区的硅/二氧化硅界面. 这个模块主要是由于表面声子散射和表面粗糙度引起的载流子散射. 低纵向电场下, 用 Mathiessen 法则来近似评估局部的载流子迁移率, 包括三个变量之和

$$\frac{1}{\mu_0(\mathbf{r})} = \frac{1}{\mu_b(\mathbf{r})} + \frac{1}{\mu_{ac}(\mathbf{r})} + \frac{1}{\mu_{sr}(\mathbf{r})}, \quad (2)$$

$\mu_b(\mathbf{r})$ 是硅体中的载流子迁移率, $\mu_{ac}(\mathbf{r})$ 受表面声学声子散射限制, $\mu_{sr}(\mathbf{r})$ 受表面粗糙度的限制, 然而, 其他的散射机理通常与表面粗糙度散射项集总在一起. (2) 式中的第二项是由于表面声学声子散射, 它影响高横向场下的反形层迁移率. 本文中采用 Lombardi 模型的公式, 通过对其模型中主要对参数取决于工艺条件的常数进行拟合, 做出修改. 图 2 分别是 $V_D = 0.1 \text{ V}$ 和 $V_D = 5 \text{ V}$ 下的实验测试

数据、默认的 Lombardi 模型和修改的 Lombardi 模型的模拟数据. 可以发现, 修改后的器件转移特性仿真结构和测试数据非常接近, 从而使得后续的单粒子效应的仿真结构具有参考价值.

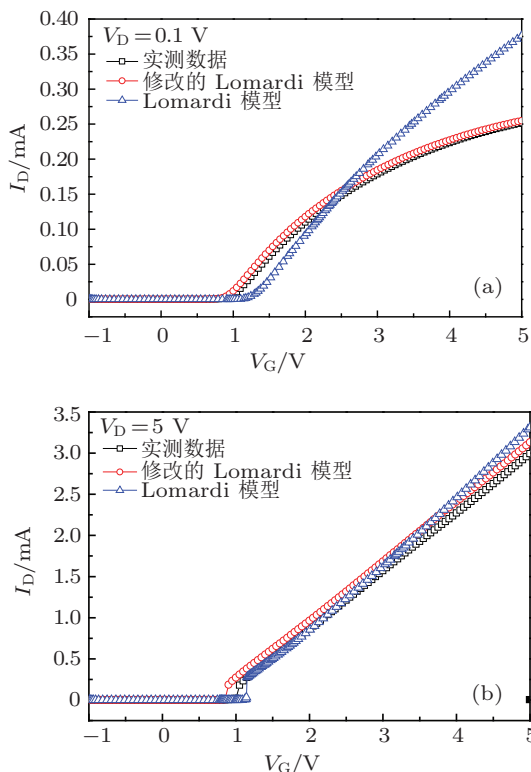


图2 器件仿真的和测试的 I_D - V_G 曲线示意图 (a) $V_D = 0.1$ V; (b) $V_D = 5$ V

3.2 通过实验测试数据计算出栅氧和埋氧中的空穴陷阱电荷密度

H 形栅 $0.8 \mu\text{m}$ SOI NMOS 器件进行总剂量实验的偏置为截止态, 辐照源为剂量率为 $50 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 的 ^{60}Co γ 射线. 辐照前后的结果如图 3 所示, 可以看出, 随着栅氧化层中俘获的正的氧化层陷阱电荷的增加, 器件的阈值电压减小, 器件泄漏电流增加. 除此之外, 当辐照剂量累积到 $200 \text{ krad}(\text{Si})$ 时, 器件的阈值漂移量较大. 当总剂量到达 $1000 \text{ krad}(\text{Si})$ 时, 器件的阈值漂移量减小. 这是因为在辐照实验过程中, 辐射诱生氧化层电荷的退火总是伴随着产生过程同时发生的. 当辐照剂量增加时, 会产生电子从氧化物价带热发射到靠近氧化物价带的陷阱能级中, 使得氧化层正电荷变成中性, 发生氧化层正陷阱电荷的退火效应.

根据对实验器件测试数据的统计分析, 发现器件背栅辐照前后的输入特性曲线的, 其具有和前栅相似的特性. 只是由于埋氧层厚度为

$0.375 \mu\text{m}$, 所以阈值漂移量更大. 但是当总剂量到达 $1000 \text{ krad}(\text{Si})$ 时, 背栅阈值电压为 5 V 左右, 并没有降低到 0 以下. 因为前栅转移特性测试时, 背栅接地, 所以前栅转移特性曲线不会受背栅的影响.

对器件测试数据的进行分析, 通过中带电压法计算出总剂量到达 $1000 \text{ krad}(\text{Si})$ 时, 前栅和背栅氧化层中性的陷阱电荷量. 假定在器件数值模拟中, 栅氧化层和埋氧层中加入的中性空穴陷阱的密度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 陷阱位于禁带中线以下 0.5 eV 处, 为均匀分布. 对器件总剂量效应进行仿真, 发现仿真结果和实验数据基本符合, 因此可以认为上述的假设条件是成立的.

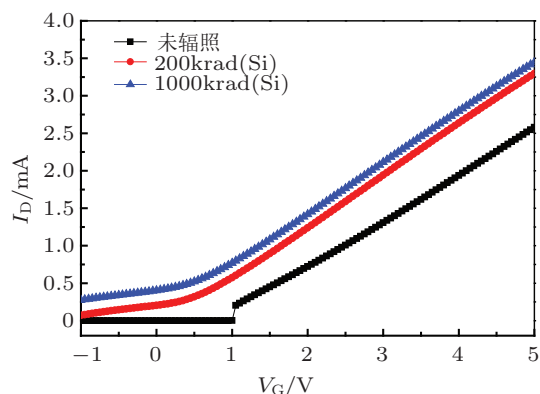


图3 截止条件下辐照前后器件的 I_D - V_G 曲线示意图

总剂量辐照过程中, 除了在氧化层中产生氧化层陷阱, 还会在氧化层和沟道界面产生一定量的界面态. 界面态陷阱主要是影响沟道载流子的迁移率, 通过 3.1 节中, 对沟道载流子迁移率模型的修改, 界面态对沟道载流子迁移率的影响已经通过对模型参数的修改加入到 (2) 式中的第二项当中. 而且考虑到仿真程序的简单和收敛性, 忽略界面态陷阱的影响是合理的.

3.3 比较相同结构的二维和三维 SOI 器件的单粒子仿真结果

三维数值模拟耗费大量时间和内存, 这也正是大部分的数值模拟研究都是采用二维模拟的原因. 二维和三维单粒子效应模拟最主要的差别是重离子入射半导体的径迹模型, 其中二维的电荷产生模型沿着器件的宽度方向是常数, 而三维模拟的电荷产生模型是圆柱形的, 这更符合现实辐射环境的. 由于重离子径迹形状不同, 因此器件的三维和二维单粒子效应仿真趋势相似但是结果不同. 其次对于

加体接触的 H 形栅 SOI 器件结构, 二维仿真亦不能满足仿真需求.

为了验证二维和三维仿真单粒子效应的区别, 首先, 让二维模拟使用的器件的宽度默认为 $8 \mu\text{m}$, 沟道长度为 $0.8 \mu\text{m}$. 和图 1 中通过 DEVICE 建立的 $8 \mu\text{m}/0.8 \mu\text{m}$ 的器件结构相同, 并且掺杂分布和剖面尺寸也保持一致. 仿真结果如图 4 所示, 从图中看到, 两种 LET 值的仿真结果, 三维模拟的漏极电流的峰值较大, 但是二维模拟相比三维的情况能产生更多的电离电荷. 三维仿真结果在 10^{-9}s 时, 漏极电流已经几乎为 0, 收集电荷趋于饱和. 但是二维单粒子效应的收集电荷在 10^{-8}s 之后才慢慢减小, 所以二维的漏极收集电荷不饱和.

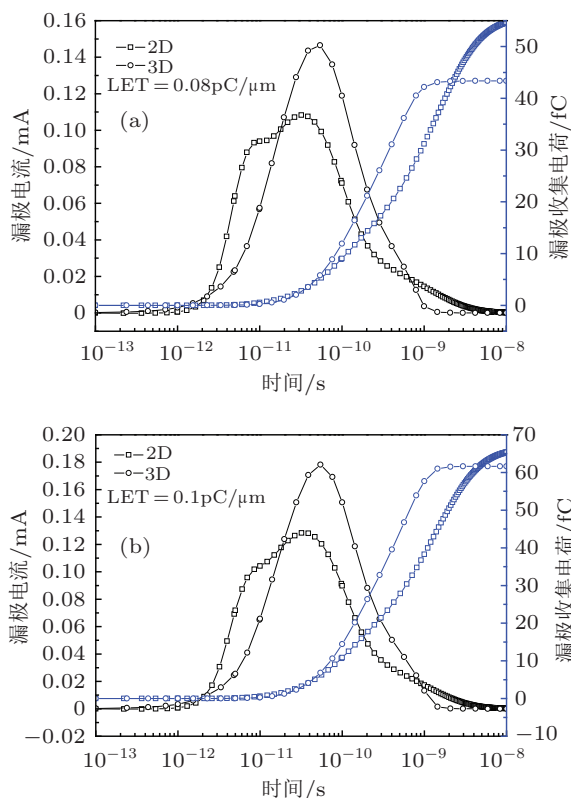


图 4 二维和三维单粒子效应仿真比较示意图 (a) $\text{LET} = 0.08 \text{ pC}/\mu\text{m}$; (b) $\text{LET} = 0.1 \text{ pC}/\mu\text{m}$

二维和三维模拟的比较结果显示, 两种模拟形式之间的漏极电流和收集电荷有很大的区别. 因此, 使用二维数值模拟只能对器件的单粒子效应做定性的分析, 如果要得到器件可靠的研究结果还是需要使用与实际比较符合的三维数值模拟的方法.

3.4 总剂量效应和单粒子效应的耦合仿真

使用上述修改的 Lombardi 模型进行软件仿真研究了处于截止态 ($V_D = 5 \text{ V}$) 的 $0.8 \mu\text{m}$ SOI NMOS

在总剂量条件下的单粒子效应. 为了验证总剂量效应对器件单粒子效应的影响, 首先, 在不加总剂量辐照的条件下, 对器件进行不同 LET 值时的单粒子效应的仿真. 仿真过程中, 栅氧化层, 隔离氧化层和埋氧层是完美的绝缘二氧化硅结构, 并且不考虑氧化层和界面的陷阱. 仿真结果如图 5 所示, 五个不同线性传输值的漏极电流脉冲和收集电荷, 可以看到漏极电流脉冲和收集电荷随 LET 的变化和理论趋势相似 [7].

当一定能量的重离子注入器件之后, 在器件体区产生大量电子空穴对. 由于截止 NMOS 管的漏/体结附近电场很高, 漏极收集漂移电子电荷, 产生漏极电流. 随着时间的推移, 当 $t = 5 \times 10^{-10} \text{ s}$ 之后, 产生由于体区空穴积累, 形成的漏极扩散电流. 直到 $t = 1 \times 10^{-8} \text{ s}$ 后, 漏极收集电流几乎减小到 0. 通过 (3) 式对漏极收集电流进行了积分, 计算出漏极收集电荷

$$Q_{\text{collect}} = \int_0^t I_{\text{drain}} dt, \quad (3)$$

其中 I_{drain} 表示漏极收集电流, Q_{collect} 表示积分后的漏极收集电荷. 积分的时间从 0 到 $1 \times 10^{-8} \text{ s}$.

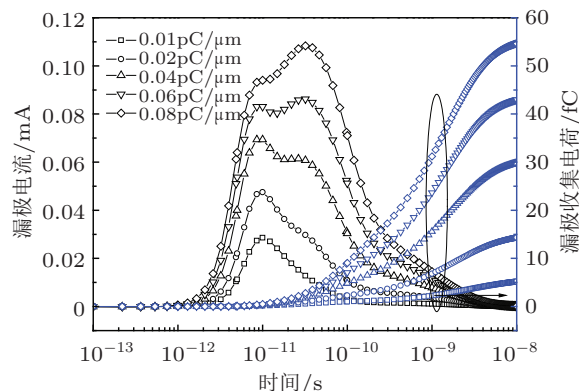


图 5 器件不同线性传输值的漏极电流和收集电荷的曲线示意图

研究和分析了不同剂量条件下, SOI 器件的单粒子效应. 器件数值模拟中, 栅氧化层和埋氧层中加入的中性空穴陷阱的密度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 陷阱位于禁带中线以下 0.5 eV 处, 为均匀分布. 文中分别对 $200 \text{ krad}(\text{Si})$ 和 $1000 \text{ krad}(\text{Si})$ 总剂量条件下, SOI NMOS 器件的单粒子效应进行了仿真, 结果如图 6 和图 7 所示.

图 8 对只考虑单粒子效应, $200 \text{ krad}(\text{Si})$ 和 $1000 \text{ krad}(\text{Si})$ 总剂量条件下, SOI 器件的单粒子效应产生的漏极电流脉冲和收集电荷进行比较. 从图 8 中可以看出, 随着总剂量水平的增加, 器件在同等条件的重离子注入下, 产生的最大漏极电流脉冲变

化较小,只是稍有增大,但是漏极收集电荷随总剂量水平增加.

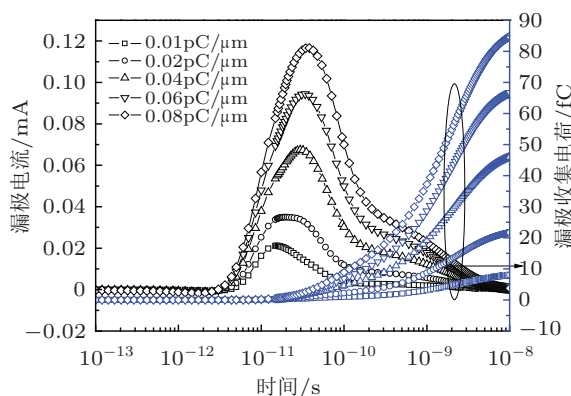


图6 200 krad(Si) 辐照后,不同线性传输值漏极电流和收集电荷的曲线示意图

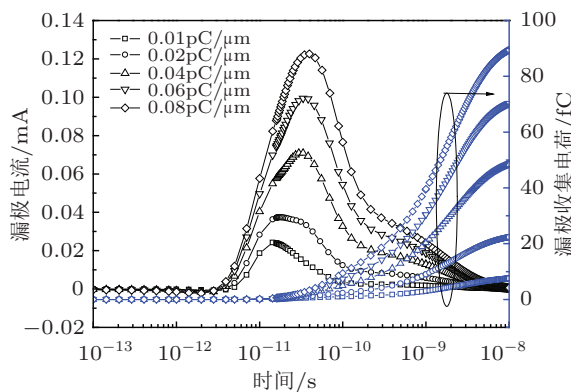


图7 1000 krad(Si) 辐照后,不同线性传输值的漏极电流和收集电荷的曲线示意图

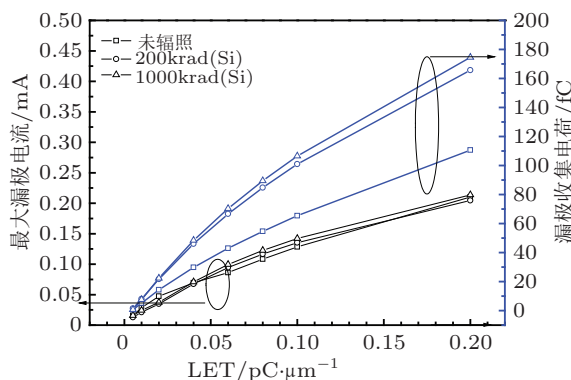


图8 不同总剂量水平下,不同线性传输值的漏极电流和收集电荷的曲线示意图

为了研究漏极电流脉冲变化不大的原因,提取不同总剂量条件下,漏极电流取最大值时 ($t = 2 \times 10^{-11}$ s) 的沟道电势(线性能量传输值取 $LET = 0.2 \text{ pC}/\mu\text{m}$) 变化,结果如图9所示.从图9中可以看出沟道下的电势随着总剂量的增加只有

很小幅度的增加,几乎没有变化.所以随总剂量水平提高,最大漏极收集电流几乎不变,这个与图8得到的结论一致.

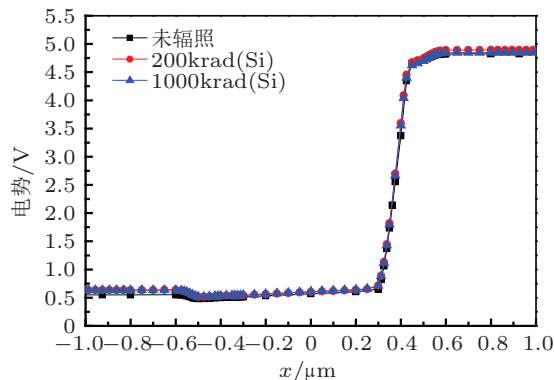


图9 不同辐照剂量条件的栅氧化层下5 nm处电势随x坐标轴的变化 ($t = 2 \times 10^{-11}$ s)

由于总剂量条件下,栅氧化层俘获了大量正的空穴陷阱电荷,因而提高了体区的电势,造成了漏极扩散电流的增大,因而最终导致漏极收集电荷的不同.总剂量效应导致的单粒子翻转截面的增加,主要是因为辐照导致的栅氧化层俘获正电荷对器件漏极收集电荷的贡献.因而可以预测存储器随着总剂量的增加,单粒子翻转截面也会有所增加.

4 结论

本文分析了三维H形栅结构SOI NMOS器件的单粒子效应,通过对比在不同漏压下的实验测试数据、默认的Lombardi模型和修改的Lombardi模型的模拟数据.可以发现,修改后的器件转移特性仿真结构和测试数据非常接近,从而使得后续的单粒子效应的仿真结构更符合实际.使用上述修改的Lombardi模型进行软件仿真研究了处于截止态 ($V_D = 5 \text{ V}$) 的SOI NMOS在总剂量条件下的单粒子效应,首先,在不加总剂量辐照的条件下,对器件进行不同LET值时的单粒子效应的仿真,可以看到漏极电流脉冲和收集电荷随LET的变化和理论趋势相似;然后,研究和分析了200 krad(Si)和1000 krad(Si)总剂量条件下,SOI器件的单粒子效应,结果表明:随着总剂量水平的增加,器件在同等条件的重离子注入下,产生的最大漏极电流脉冲变化较小,只是稍有增大,但是漏极收集电荷随总剂量水平增加幅度较大.

- [1] Dodd P E 2005 *IEEE Trans. Dev. Mater. Rel.* **5** 343
[2] Dodd P E, Massengill L W 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 583
[3] Tao W, Li C, Dinh A, Bhuvu B 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3556
[4] Gouker P, Brandt J, Wyatt P, Tyrrell B, Soares A, Knecht J, Keast C, McMorrow D, Narasimham B, Gadlage M, Bhuvu B 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 2854
[5] Gadlage M J, Gouker P, Bhuvu B L, Narasimham B, Schrimpf R D 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3483
[6] Kobayashi D, Saito H, Hirose K 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 1037
[7] Zhuo Q Q, Liu H X, Hao Y 2012 *ActaPhys. Sin.* **61** 218502 (in Chinese) [卓青青, 刘红侠, 郝跃 2012 物理学报 **61** 218502]
[8] Liu Z, Chen S, Liang B, Liu B W, Zhao Z Y 2010 *ActaPhys. Sin.* **58** 649 (in Chinese) [刘征, 陈书明, 梁斌, 刘必慰, 赵振宇 2010 物理学报 **58** 649]
[9] Sentaurus Device User Guide 2010 Synopsys Inc.

Single event effect of 3D H-gate SOI NMOS devices in total dose ionizing*

Zhuo Qing-Qing[†] Liu Hong-Xia Wang Zhi

(Key Laboratory for Wide Band Gap Semiconductor Materials and Devices of Ministry of Education, School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 24 March 2013; revised manuscript received 28 May 2013)

Abstract

The single event effect of H-gate SOI NMOS devices in total dose ionizing are studied by means of numerical simulation. By analyzing the mobility degradation in the simulation process, the corrected mobility Lombardi model due to degradation at interfaces is obtained. As the simulated transfer characteristic curves of SOI transistor agree well with the experimental data, the single event effect of H-gate SOI NMOS devices in total dose ionizing is simulated by this corrected model. Results shows that the maximum drain currents of devices under the same conditions are slight increasing, but the transistors get a significant increase in the drain collected charge with increasing total dose level.

Keywords: single event transient current, collected drain charge, total does ionizing

PACS: 61.80.Az, 02.60.Cb, 07.89.+b

DOI: 10.7498/aps.62.176106

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61076097, 60936005), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (Grant No. 200110203110012).

[†] Corresponding author. E-mail: zhuoqq.2006@163.com