

体硅 nFinFET 总剂量效应三维 TCAD 仿真研究

黄云波^{1,2,3}, 李 博^{1,2}, 杨 玲^{1,2}, 郑中山^{1,2}, 李彬鸿^{1,2}, 罗家俊^{1,2}

(1 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029; 2 中国科学院 硅器件与技术重点实验室, 北京 100029;

3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 本文利用 Sentaurus TCAD 仿真软件对体硅鳍形场效应晶体管(FinFET)的总剂量效应(TID)进行了详细的数值模拟研究. 基于良好校准后的器件模型, 仿真结果表明: 高沟道阻挡层掺杂浓度, 大鳍宽, 锥形鳍截面形状的 FinFET 器件对总剂量效应有良好的抑制作用. 进一步的 Gamma 总剂量辐射仿真展示了辐照过程中浅槽隔离(STI)氧化层中陷阱空穴的形成. 最后, 利用 Sentaurus TCAD 软件混合仿真模式对电路级别的总剂量响应进行了模拟分析, 结果表明电路的性能和可靠性在总剂量辐照之后均受到了极大的影响.

关键词: 鳍形场效应晶体管; 总剂量效应(TID); 浅槽隔离(STI); TCAD

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)08-0042-06

Three-dimensional TCAD Simulation Study of the Total Ionizing Dose Effect on Bulk nFinFET

HUANG Yun-bo^{1,2,3}, LI Bo^{1,2}, YANG Ling^{1,2},
ZHENG Zhong-shan^{1,2}, LI Bin-hong^{1,2}, LUO Jia-jun^{1,2}

(1 Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 Key Laboratory of Silicon Device Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Using Technology Computer Aided Design (TCAD) simulation, the total ionizing dose(TID) effect of bulk fin field-effect transistor(FinFET) is investigated in detail. Based on well calibrated device model generated, it is shown that FinFETs with high channel stop doping concentration, large fin width and tapered fin cross-section shape exhibit great TID immunity. Further gamma radiation simulation illustrates the evolution of trapped holes in shallow trench isolation (STI) oxide. In addition, circuit level response of TID effect is analyzed using Sentaurus mixed-mode simulation method. It is demonstrated that the performance and stability suffer adverse degeneration during TID.

Key words: FinFET; total ionizing dose(TID); shallow trench isolation (STI); technology computer aided design (TCAD)

1 引言

为了推进先进纳米尺度器件在航天高可靠集成电路中的应用, 研究 FinFET 等新型器件的总剂量辐射效应十分有必要^[1]. 绝缘体上硅(SOI) FinFET 的总剂量效应已经被广泛研究, 然而体硅 FinFET 的总剂量效应的相关文献数量十分有限. 对于体硅

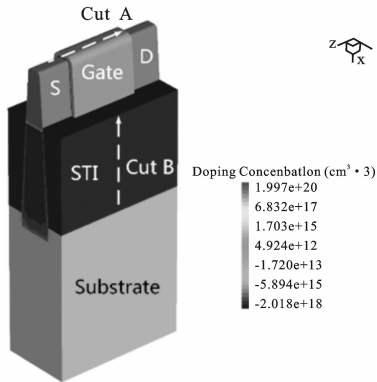
FinFET 工艺来说, 最近的研究表明位于 Fin 底部的浅槽隔离(STI)氧化层中辐射导致的正电荷的产生和俘获是总剂量效应的主要原因^[2].

本文利用 Synopsys 公司的 Sentaurus TCAD 仿真软件模拟研究了 nFinFET 的总剂量效应, 分析了不同沟道阻止区掺杂浓度和鳍宽下固定电荷的影响. 进一步的 Gamma 辐照仿真表征了 STI 区陷阱

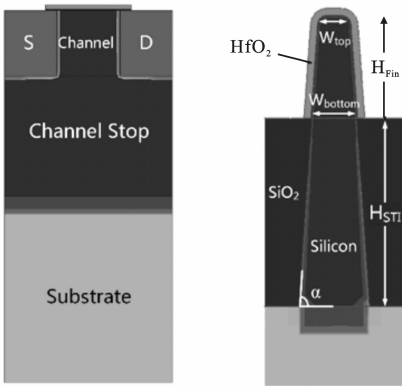
空穴的产生和分布.最后,利用 Sentaurus 混合仿真模式模拟研究了反相器和环形振荡器电路特性的总剂量辐照响应.

2 物理模型和器件结构

图 1 为利用 Sprocess 工艺仿真工具构建的体硅 nFinFET 器件三维模型示意图,具体的掺杂浓度和几何结构参数如表 1 所示.其中,如果鳍的底角 α 固定,FinFET 器件的有效鳍宽为: $W_{\text{eff}} = W_{\text{top}} + 2H_{\text{Fin}}/\sin\alpha$.



(a)三维结构图



(b)二维截面 A (c)二维截面 B

图 1 器件结构示意图.

基于器件物理,Sdevice 仿真工具中应用的物理模型为:(1)Hydrodynamic 传输模型,(2)Shockley - read - hall (SRH) 产生-复合模型,(3)迁移率退化模型:IALMob 模型, Thin-layer 迁移率模型, High-k 迁移率退化模型,(4)Density-gradient 量子化模型(5)带-带隧穿模型,(6)Gamma 辐射模型.

在进行器件的总剂量辐照仿真时,Sentaurus 中的 Gamma radiation 模型在应用时存在很大限制,即在总剂量效应最敏感的 SiO₂ 材料中模型不起作用^[3].我们通过将 SiO₂ 材料替换为新定义的半导体

属性的材料,再把该材料的各项电学参数设置为和 SiO₂ 一样,这样总剂量辐照模型就可以激活^[4].另外一种普遍使用的仿真方法是通过在 SiO₂ 材料添加氧化层固定正电荷来模拟实际辐照带来的影响^[5].本文先后运用这两种仿真方法对 FinFET 器件的总剂量效应进行了模拟研究.

表 1 器件的结构和工艺参数

参数	数值	单位
栅长	30	nm
鳍高	35	nm
STI 深度	100	nm
HfO ₂ 厚度	2.4	nm
界面 SiO ₂ 厚度	0.6	nm
源/漏掺杂浓度	2×10^{20}	cm^{-3}
沟道掺杂浓度	2×10^{18}	cm^{-3}
衬底掺杂浓度	1×10^{16}	cm^{-3}

3 仿真结果分析

3.1 仿真模型校准

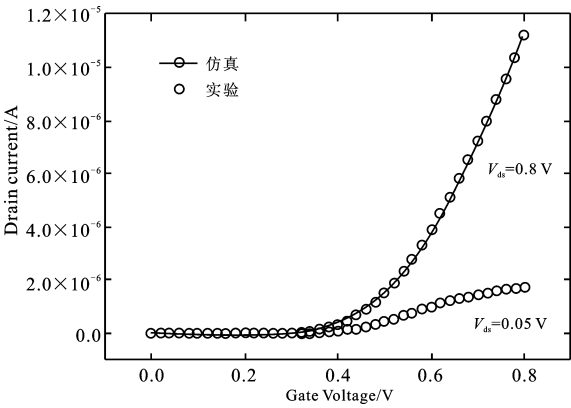
TCAD 模型的校准是器件仿真过程中关键的一步,对仿真需要的物理模型进行修改使得仿真结果与实验测试数据一致,这样 TCAD 仿真结果的正确性以及可参考性得到了提升.

本文中用于模型校准的器件电学曲线测试数据是由中科院微电子研究所集成电路先导工艺研发中心提供,测试器件为高 k/金属栅工艺 30 nm 体硅 nFinFET.校准过程中主要调整金属栅功函数和 IALMob 迁移率模型中的工艺调整因子.器件 $I_d - V_g$ 转移曲线和 $I_d - V_d$ 输出曲线的仿真结果和测试结果如图 2 所示.由图可知,器件电学参数的 TCAD 仿真结果和实验数据之间有良好的拟合效果.

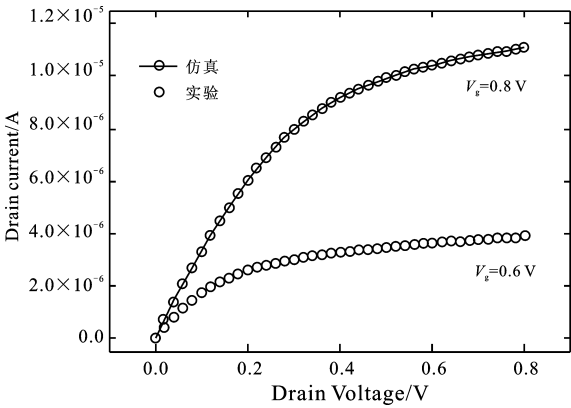
3.2 固定正电荷仿真

对于 FinFET 等先进纳米尺度 MOS 器件,由于栅氧化层厚度极度减薄,总剂量辐照导致的栅氧化层中的电荷积累效应可以忽略不计.已有的文献指出体硅 FinFET 在总剂量辐照下的器件参数退化主要是由 STI 区空穴的产生和俘获^[2].为了模拟总剂量效应对 FinFET 的影响,我们在 Fin/STI 界面处添加不同面密度的固定正电荷.

如图 3 所示,Fin/STI 界面正电荷密度的增加会导致关态漏电流数量级的上升.当电荷密度大于 $1\times10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时关态漏电流开始出现显著增加,这意味着器件的寄生晶体管开始反型导通.当电荷密度达到 $2\times10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时,关态漏电流比无电荷时高四个数量级,意味着器件不能正常关闭.图 4 为关态电流密度二维截面图.可以看到,沟道下方的寄生导电沟道的形成是关态漏



(a) $I_d - V_g$ 转移曲线



(b) $I_d - V_d$ 输出曲线

图 2 仿真和实验结果对比

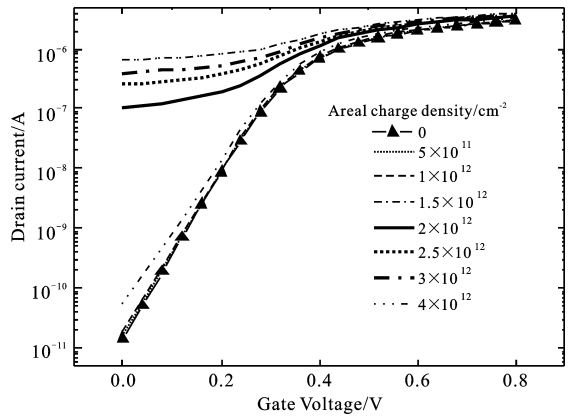
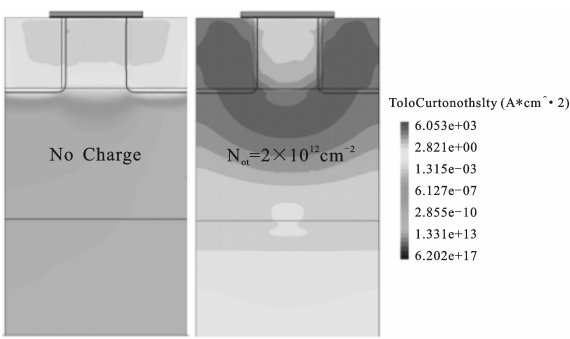


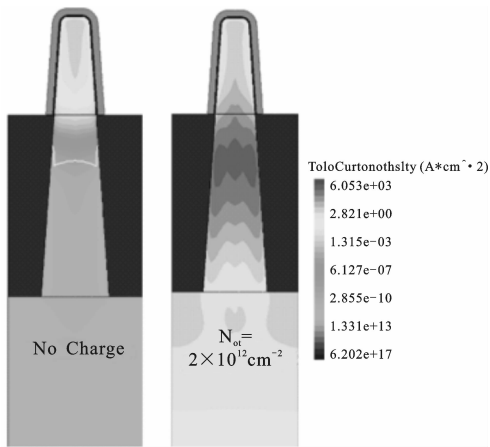
图 3 Fin/STI 不同正电荷密度下 $I_d - V_g$ 曲线
($V_{ds}=0.05V$)

电流增加的原因,栅极对沟道强烈的控制作用使从漏至源的漏电流通路呈弧形.实际总剂量辐射过程中,STI 氧化层俘获的电荷密度大小是由氧化层制造工艺决定的,如氧化层淀积温度^[6].

总剂量导致的关态泄露电流的增加是由于沟道阻止区域的寄生晶体管的反型开启,那么沟道阻止区域的掺杂浓度是影响 FinFET 总剂量敏感度的一个重要参数.沟道阻止区掺杂浓度越大,寄生晶体管



(a) 二维截面 A



(b) 二维截面 B

图 4 关态电流密度 ($V_{gs}=0V$, $V_{ds}=0.05V$)

的反型层越难形成,总剂量导致的关态漏电流的退化就得到了抑制.沟道阻止区掺杂浓度可以作为体硅 FinFET 器件抗总剂量效应加固的有效手段.图 5 显示了不同掺杂浓度下,关态漏电流随正电荷密度的变化.由图可知,当掺杂浓度达到 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时,漏电流随正电荷密度的增加几乎不变化,可被视为对总剂量免疫.

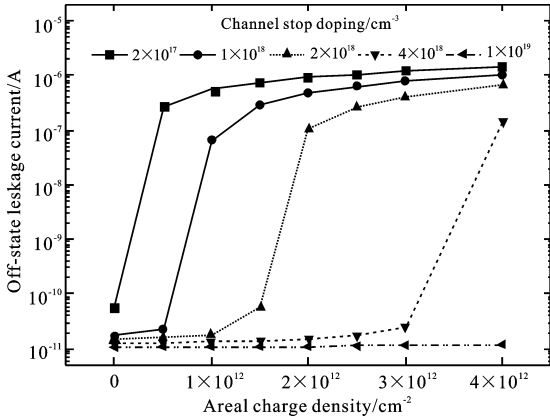


图 5 沟道阻止区掺杂浓度对关态漏电流变化的影响

图 6 显示了鳍宽对总剂量响应的影响,其中 $W_{\text{Fin}} = W_{\text{top}} = W_{\text{bottom}}$. 为了方便比较,图中的漏电流数据是除以鳍宽做归一化处理后的. 如图所示,总剂量辐射之后,体硅 FinFET 鳍越宽,泄漏电流变化越小. 这是因为体硅 FinFET 的鳍宽能够影响 STI 俘获的电荷分布,当鳍宽降低时,STI 区俘获的正电荷与沟道中心的距离减小,更易于影响沟道泄漏电流. 这与 SOI FinFET 呈现的趋势正好相反^[7],因为鳍宽越小的 SOI FinFET 俘获的电荷数量更少,并且分布在埋氧层的底部,不易改变器件的泄漏电流. 鳍宽是影响体硅 FinFET 总剂量效应的重要参数之一,然而增加鳍宽会降低 FinFET 栅极对沟道的控制能力,从而失去 FinFET 的器件结构的优势. 文献[8]指出鳍宽越小,FinFET 对短沟道效应和热载流子注入(HCI)效应的抑制能力越强. 采用锥形的鳍结构可以一定程度上缓解器件性能和抗总剂量能力之间的矛盾. 鳍的形状对器件的泄漏电流有很大的影响,文献[9]研究表明对于同样鳍底部宽度的方形鳍 FinFET 来说,锥形鳍结构能够有效降低 70% 的泄漏电流. 事实上,锥形鳍结构可视为在沟道区域拥有较小的等效鳍宽,而在沟道阻止区域拥有较大的等效鳍宽. 如图 7 所示,锥形鳍结构的 FinFET 总剂量导致的漏电流退化更小. 经过合理优化过的鳍结构理论上可以同时实现高器件性能和抗总剂量能力.

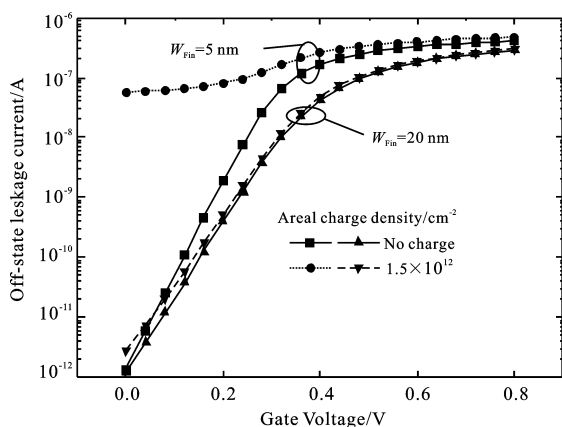


图 6 W_{fin} 为 5 nm 和 20 nm 时 $I_d - V_g$ 曲线仿真结果

3.3 Gamma 总剂量仿真

为了表征 STI 区辐射导致的正电荷的俘获和分布,可以激活 Sentaurus 中的 Gamma 辐照模型进行三维总剂量辐照仿真. 由于仿真器默认不会在绝缘体中解陷阱方程,所以 Gamma 辐照模型对总剂量最为敏感的 SiO_2 材料不起作用. 为了能够计算氧化层中的泊松和电流连续方程,我们修改仿真参数将氧化层材料设置为禁带宽度为 9.0 eV 的宽禁带

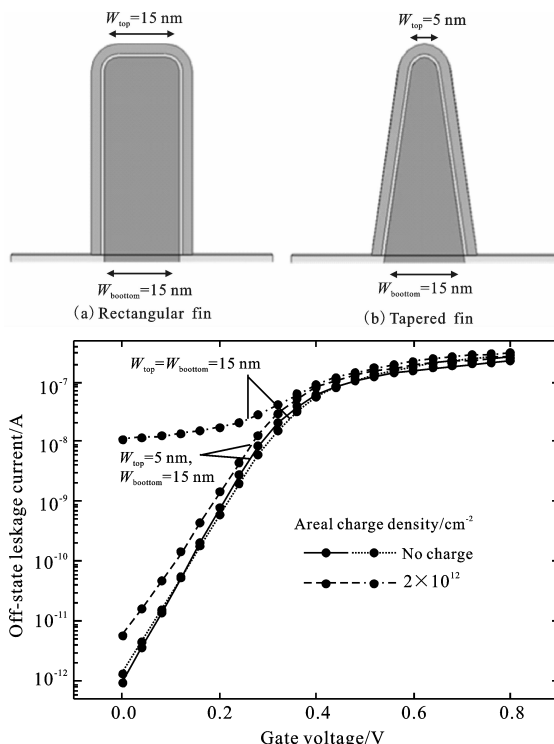


图 7 锥形和方形鳍形 FinFET 仿真对比

半导体. 并在此区域里定义陷阱,以便在这些区域里求解瞬态陷阱方程. 辐射导致的电子空穴对的产生和局部电场以及总辐射剂量相关,在 Gamma 辐照模型中表示如下:

$$G_{\gamma} = g_0 D \cdot Y(E)$$

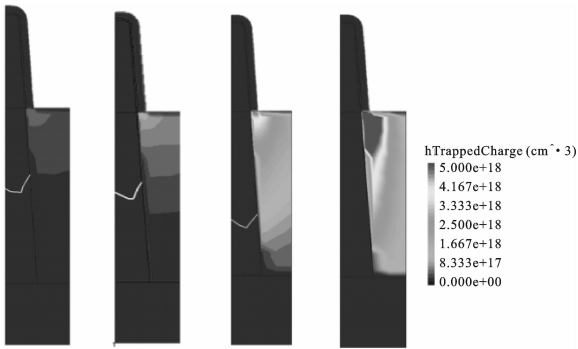
$$Y(E) = \left(\frac{E + E_0}{E + E_1} \right) m$$

式中, G_{γ} 是辐照在氧化层中引起的电荷产生率; D 为辐射剂量率; E 为电场强度; g_0 为单位剂量率下电子空穴产生速率; E_0, E_1, m 均为常数.

新建的宽禁带半导体材料的关键仿真参数设置如下: 均匀空穴俘获陷阱密度 $N_{\text{tr}} = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 空穴俘获截面积为 $\sigma_p = 6.8 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$, 电子俘获截面积为 $\sigma_n = 1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$. 氧化层中载流子的传输通过求解标准漂移-扩散方程近似表征, 电子和空穴有效迁移率分别设置为 $\mu_n = 20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$. 这样, 总剂量辐射下产生电子空穴对, 电子在几皮秒内会被扫出氧化层, 而空穴会沿着局部电场线运动, 被 STI 层俘获, 形成漏电通道.

图 8 显示了 STI 氧化层俘获空穴的产生和分布, 仿真时期间偏置在 ON 态, 即 $V_G = 0.8 \text{ V}$, 其他电极接地. 为了提高仿真效率, 这里只仿真了一半的器件结构. 俘获空穴的分布主要由局部电场线决定, 可以看到空穴主要在分布在 STI 区的顶部靠近

STI/Fin 界面区域. 图 9 显示了 STI/Fin 界面处距离 STI 顶部 10 nm 处的俘获空穴沿着沟道方向的分布情况. 由于仿真偏置为 ON 态, 所以源漏两端的电荷分布是对称的. 由图可知, 俘获空穴主要分布在器件特性最为敏感的沟道区域. 图 10 为不同剂量辐照后器件 I_d-V_g 转移曲线的仿真, 与之前的固定电荷仿真结果类似. 通过比较两者, 我们也可以估算不同辐照剂量诱生的空穴平均密度.



(a)50krad(si); (b)100krad(si); (c)500krad(si); (d)1Mrad(si)

图 8 STI 俘获空穴的分布.

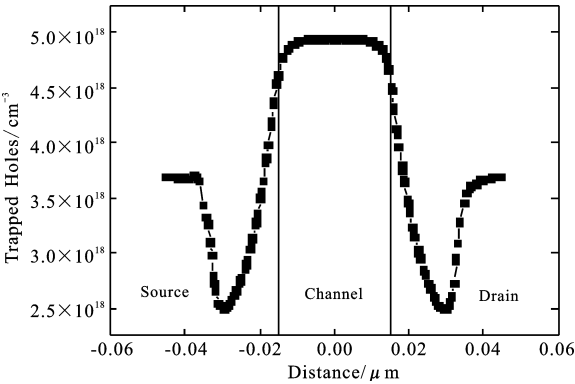


图 9 沿沟道方向俘获空穴的分布

3.4 总剂量效应的电路级影响

Sentaurus TCAD 混合模式仿真通过分别求解每个器件的半导体特性方程来模拟简单的电路级特性. 电路仿真中采用的器件都是 30 nm FinFET, 沟道阻止区掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 鳍宽为 15 nm. 总剂量辐射效应的影响是通过 STI/Fin 界面添加固定电荷来模拟. 虽然这种仿真方法不能精确地模拟实际辐照环境, 但是仿真结果可以看出总剂量电路特性响应的大体趋势.

图 11 显示了 FinFET 反相器电压传输曲线. 当没有电荷引入时, 反相器的高低电平转换点在 $V_{DD}/2$ 附近, 输入输出转移特性良好. 当固定正电荷

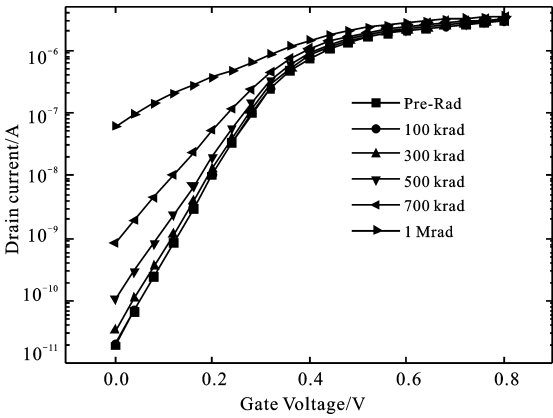


图 10 辐照后器件 I_d-V_g 转移曲线的仿真

的密度增加时, 反相器电平转换斜率不再陡峭. 当电荷密度达到 $2.5 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-2}$ 时, 输出高电平甚至不能到达 V_{DD} . 这是因为反相器的输出电压保持在高电平 (V_{DD}) 时, nFinFET 应该保持完全关闭. 当电荷密度达到 $2.5 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-2}$ 时, nFinFET 的泄漏电流足够大以至于寄生放电通路开始形成, 所以输出节点的电压不再能够维持在 V_{DD} . 电平转移区间宽度的增加也降低了反相器的噪声容限, 意味着反相器对噪声干扰更敏感了. 反相器在总剂量辐照之后的工作状态变得不稳定, 抗干扰能力降低.

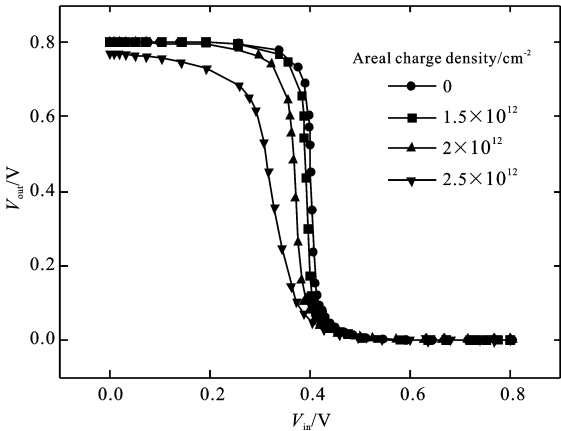


图 11 FinFET 反相器 VTC 曲线

环形振荡器通常是有奇数个反相器级联而成, 形成一个首尾相连的环路. 本文仿真了用三级 FinFET 反相器构成了一个环形振荡器, 电源电压为 0.8 V. 如图 12 和 13 所示, 辐射导致的漏电流的增加会导致环振工作频率的增加和电压摆幅的降低. 泄漏电流的增加会增加输出节点电容充放电速度, 从而环振的工作频率会提高. 当反相器中 pFinFET 开启后, 导通电流充当节点电容的充电电流. 总剂量导致的 nFinFET 泄漏电流会抽取充电电流的一部

分,导致输出电压摆幅的降低.当电路处理数字信号时,电压摆幅的降低很可能会导致信息丢失.此外,CMOS 集成电路的动态功耗也是影响电路性能的重要参数, $P=CV2f$.很明显,工作频率的提高将会导致动态功耗的增加.

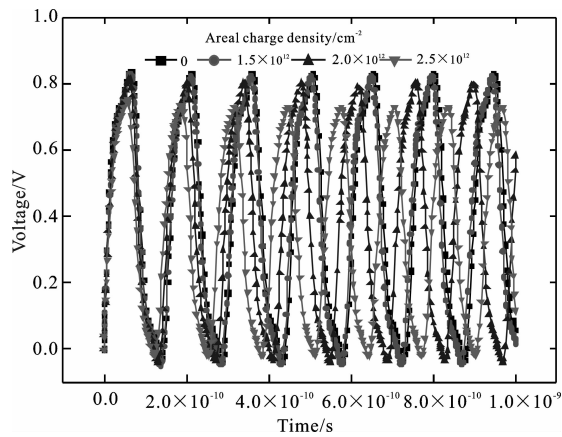


图 12 三阶环形振荡器输出节点电压

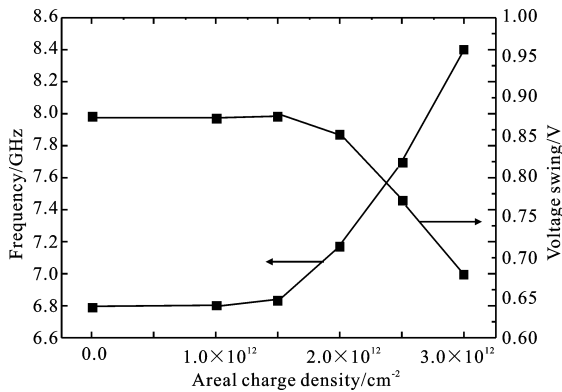


图 13 工作频率和电压摆幅的变化

4 结束语

本文利用 sentaurus TCAD 软件对体硅 nFinFET 的总剂量效应进行了详细的仿真研究.仿真模型与实验数据进行了良好的校准.固定电荷仿真表明:高沟道阻止区掺杂、大鳍宽、锥形鳍结构的 FinFET 对总剂量效应的抑制能力强.进一步的 Gamma 辐照仿真展示了 STI 区俘获空穴的产生和分布,表明俘获的空穴在 ON 态偏置下沿着电场线的方向主要分布在 STI 区的顶部.最后,对基于 FinFET 的反相器和环振电路特性分别进行了仿真.仿真结果对 FinFET 器件和电路总剂量辐射环境下的响应做出了预测,也可以为未来器件抗辐照性能优化以及面向空间辐射环境的基于 FinFET 的集成电

路设计方法提供参考意见.

参考文献:

[1] Skotnicki T, Hutchby J A, Tsu Jae K, et al. The end of CMOS scaling; toward the introduction of new materials and structural changes to improve MOSFET performance[J]. IEEE Circuits and Devices Magazine, 2015(25);16-26.

[2] Chatterjee I, Zhang E X, Bhuva B L, et al. Bias dependence of total-dose effects in bulk FinFETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013 (60); 4476-4482.

[3] Fernández-Martínez P, Cortés I, Hidalgo S, et al. Simulation of total ionising dose in MOS capacitors[J]. Electron Devices, 2011;1-4.

[4] 张丹. 65nm 工艺下 MOSFET 的总剂量辐照效应及加固研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2015.

[5] 李念龙, 于奇, 王凯, 等. MOS 结构 γ 总剂量效应仿真模型研究[J]. 微电子学, 2013, 43 (3) :445-448.

[6] Mrstik B J, Hughes H L, Lawrence R K, et al. Comparison of charge trapping in undoped oxides made by low- and high-temperature deposition techniques[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, 48(6); 2107-2113.

[7] Gaillardin M, Paillet P, Ferlet-Cavrois V, et al. Total ionizing dose effects on triple-gate FETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, 53 (6) :3158-3165.

[8] Lin C L, Hsiao P H, Yeh W K, et al. Effects of fin width on device performance and reliability of double-gate n-type FinFETs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60 (11) :3639-3644.

[9] Gaynor B D, Hassoun S. Fin shape impact on finfet leakage with application to multithreshold and ultralow-leakage finfet design[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(8):2738-2744.

作者简介:

黄云波 男,(1994-),硕士研究生.研究方向为 FinFET 器件总剂量辐射效应和可靠性问题.

罗家俊(通讯作者) 男,(1973-),研究员,博士生导师.研究方向为深亚微米集成电路低功耗设计技术、高性能深亚微米数模混合集成电路设计技术、智能功率集成电路设计技术等. E-mail:luojj@ime. ac. cn.