深亚微米 nMOSFET 器件的总剂量电离辐射效应*

孟志琴　郝　跃†　唐　瑜　马晓华　朱志炜　李永坤

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

摘要： 选取了采用 0.25μm 工艺的两组器件进行研究. 通过对这两种器件关态泄漏电流、跨导和栅电流等电学参数进行分析，得出当器件发展到深亚微米阶段时，影响其辐射效应的主要原因是场氧化层中的陷阱电荷. 并对相关机理进行了分析和仿真验证.

关键词： X 射线；辐射；总剂量效应；关态泄漏电流
EEACC： 2560
中图分类号： TN386　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 0253-4177(2007)02-0241-05

1　引言

随着空间技术、核技术的发展，器件的辐射效应越来越受到人们的关注. 当集成电路的特征尺寸发展到深亚微米阶段，根据等比例缩小的原则，栅氧化层厚度减小到 5nm 以下，辐射效应更加显著，以往大尺寸中不明显的效应也突显出来而成为新损伤因素[1]. 使用于空间辐射、核辐射环境中的深亚微米器件其性能会受到什么样的影响，越来越被人们关注.

本文中，我们选取了特征尺寸为 0.25μm 的两组器件做了总剂量辐射实验. 该工艺下标准的器件栅氧化层厚度为 5nm，此时栅氧厚度已经非常薄. 现有研究结果表明，较薄的栅氧化层厚度使器件抗总剂量性能变得更加良好[2]. 这是因为到深亚微米阶段，已经很薄的栅氧化层中产生的界面陷阱和氧化层陷阱很少，这就使大尺寸器件中影响辐射总剂量效应的主要因素变得不再重要.

有研究表明，辐射总剂量效应与器件的隔离技术有密切的关系，目前，已有相关文献对各种不同隔离方式的器件进行了仿真和实验研究[3~8].

本文对标准工艺下 0.25μm 器件进行总剂量辐射实验，通过对各种电参数的比较，进一步分析深亚微米阶段下辐射总剂量效应的主要影响因素和机理.

2　实验

本实验所用的样品为 0.25μm 标准 CMOS 工艺下的器件，第一组样品，器件宽长比为 5.0μm/0.25μm；第二组样品，宽长比为 5.0μm/0.35μm，栅氧厚度为 5nm. 现阶段，在辐射环境中 MOS 结构器件上所加偏置条件是影响总剂量辐射效应的主要因素[3]. 对于 nMOSFET，开态偏置(即栅极上的偏压 V_G 加正电压 V_{DD}，漏极，源极和衬底上的偏压 V_D，V_S，V_{SUB} 都接 0V)为最劣偏置. 这是因为此时场氧化层中的电场最大，并且直接指向衬底. 为了在一定的总剂量下电离辐照效应更加明显，更便于提取参数，在实验过程中我们采用高剂量率，开态偏置辐照，以此来研究在最不利条件下的器件辐照规律.

实验中，样品采用开态辐照偏置，辐射实验是在 AROCOR 4100 型 X 射线源上进行的. X 射线仪上的辐射剂量率为 1×10^5 rad(Si)/min，累积总剂量达 2×10^6 rad(Si). MOS 器件的参数测量是在半导体器件参数精密测量仪 HP4155B 上完成的. 对辐照 MOS 器件的测试是在辐照到一定总剂量后移位进行测试的，且每次测试都是在辐射完成后 10min 内进行.

3　结果与分析

图 1 给出了 0.25μm 工艺下选取的两组器件在不同的辐射总剂量下转移特性的变化曲线. 辐照前，*I-V* 特性曲线表明栅电压为负时，由栅引起的漏极泄漏电流的原因是沟道和漏区之间的带间隧穿. *I-V* 特性曲线没有随总剂量增加而平移，说明在薄栅氧层中，产生的氧化层陷阱电荷和界面陷阱电荷可以忽略. 辐照时选取剂量率为 100krad(Si)/min. 从图 1(a)中可以看出，对于第一组器件随着辐射总剂量的增加，关态泄漏电流一直在增加. 辐射引起的场

* 国家自然科学基金资助项目(批准号：60376024)
† 通信作者. Email：yhao@xidian.edu.cn
2006-08-25 收到，2006-10-11 定稿

氧化层陷阱电荷使总剂量达到 200krad(Si) 之后关态泄漏电流显著增加，到总剂量达到 1Mrad(Si)时，其基本达到饱和.

相同工艺下的第二组器件在不同的辐射总剂量下转移特性的变化曲线在图 1(b)中给出. 从图中可以看出，第二组器件，随着辐射总剂量的增加，其关态泄漏电流与前一组器件一样呈现出随辐射总剂量的增加而增加的趋势. 但是这个趋势并没有前者明显. 辐射总剂量增加到 1Mrad(Si)时，其关态泄漏电流并没有明显的增加. 但增加的趋势已经说明，由于栅氧化层厚度已经非常薄，栅氧化层中空穴陷阱和界面态的产生都可以忽略，此时，边缘效应的影响变为主要因素.

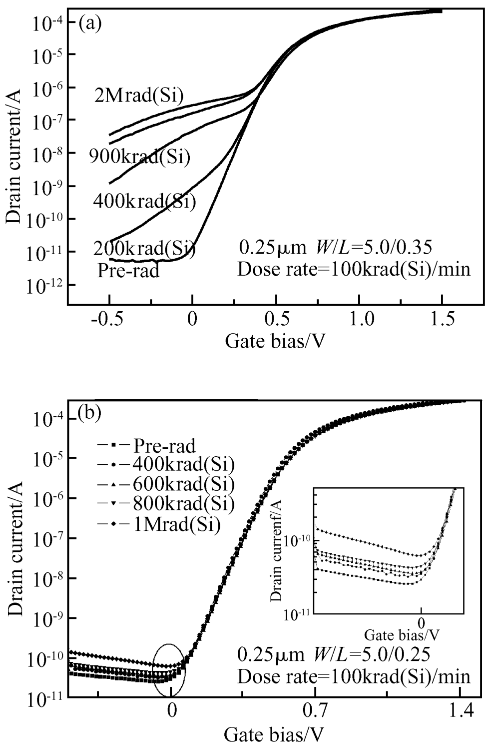

图 1 所选两组 0.25μm 工艺下的器件转移特性随辐射总剂量增加的变化曲线 (a)第一组，电离辐射使栅电压为 0V 时的关态泄漏电流显著增加；(b)第二组，电离辐射使栅电压为 0V 时的关态泄漏电流增加，但增加的幅度不大

Fig. 1 Dependence of sub-threshold current characteristics on total dose for chosen 0.25μm devices (a) Group 1: Ionizing radiation exposure increases the off-state leakage current obviously corresponding to 0V gate bias; (b) Group 2: The increase is very little

图 2 分别给出两组器件辐照前后的跨导曲线. 由图 2(a)可以看出，对于第一组器件随着辐射总剂量增加，跨导曲线一直在退化，直到总剂量达到 400krad(Si)以上时，跨导曲线才不再退化. 从初始状态到辐射总剂量达到 400krad(Si)，跨导退化量达到 30%. 而图 2(b)中给出的第二组器件的跨导曲线随着辐射总剂量的增加并没有明显的退化.

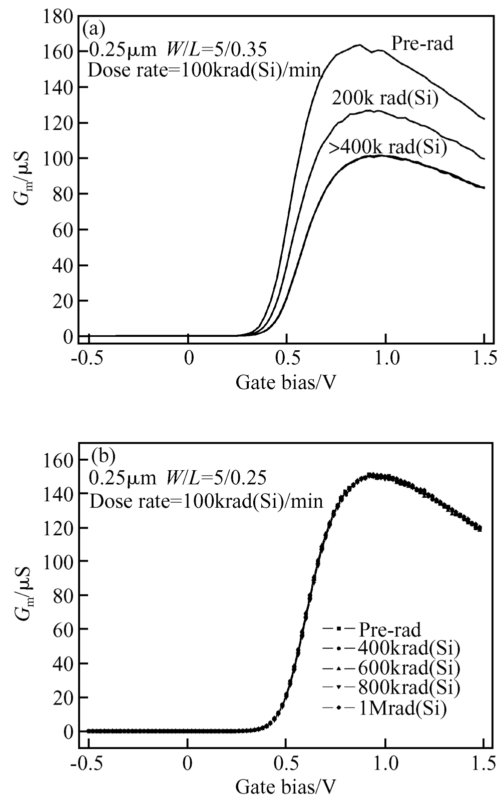

图 2 所选两组 0.25μm 工艺下的器件在 V_D 为 0.1V 时辐照前后跨导随栅电压的变化曲线 (a)第一组，辐照前总剂量为 200krad(si)和总剂量大于 400krad(si)，跨导曲线先退化后趋于饱和；(b)第二组，随着总剂量的增加，跨导曲线基本没有退化

Fig. 2 nMOSFET transconductance as a function of the gate voltage measured with $V_D = 0.1$V for chosen 0.25μm devices (a) Group 1: First the transconductance degenerates, then it achieves the saturation condition; (b) Group 2: The transconductance dose not degenerate corresponding to total dose

由图 2 所示跨导的变化，可以认为辐射产生的已经不是单纯的氧化层陷阱和界面陷阱，而是与边缘关系密切的更为复杂的浅能级陷阱 E'_δ 中心. 由于栅氧化层非常薄，辐射在场氧化层隔离区产生的陷阱电荷浅能级陷阱 E'_δ 中心等成为影响辐射总剂量效应的主要因素. 与栅氧化层热氧化生长方式不同，场氧化区是通过多种淀积技术得到的. 场氧化层厚度比栅氧化层厚得多. 随着辐射总剂量的增加，由辐射引入的空穴通过这样的浅能级陷阱向 Si-SiO_2 界面扩散，其中一部分被深能级陷阱俘获，沟道的边缘杂质浓度增大，边缘泄漏电流增加，跨导退化，这与辐射总剂量效应和隔离技术有关的解释是一致的.

除了关态泄漏电流和跨导之外，我们还考查了这两种器件栅电流随辐射总剂量的变化，如图 3 所示. 图 3(a)给出了第一组器件的栅电流变化曲线，从图中可以看出，辐射总剂量比较小的时候，栅电流基本没有变化，直到总剂量达到 1Mrad(Si)时，栅电流才出现明显的增加，但增加量不大. 图 3(b)中，第二组器件的栅电流随着辐射总剂量的增加一直在增加，当总剂量达到 1Mrad(Si)后，栅电流有明显的增加，但从辐照前到总剂量达到 1Mrad(Si)过程中，栅电流增加量也不大，约为一个数量级.

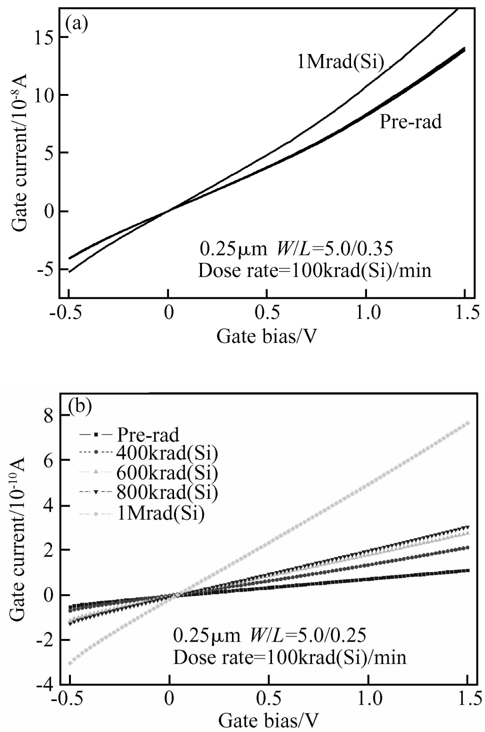

图 3　所选两组 0.25μm 工艺下的器件在 V_D 为 0.1V 时辐照前后栅电流随栅电压的变化曲线　(a)第一组；(b)第二组

Fig.3　Gate current curves of before and after irradiation as a function of the gate voltage for the chosen 0.25μm devices　(a) Group 1；(b) Group 2

对两种器件的栅电流分析可以看出，第一组器件的栅泄漏电流随着辐射总剂量增加的敏感程度要比第二组器件弱. 但是从图上可以看出，两种器件栅电流随辐射总剂量的变化都不超过 1 个数量级.

对以上关态泄漏电流、跨导和栅电流三个电参数的比较可以看出，对于深亚微米器件，其抗辐射机理发生了根本的改变. 影响辐射总剂量效应的已经不再是常规认识中的氧化层陷阱电荷和界面陷阱，而是与隔离有关的场氧化层变成了主要因素.

而对于同样标准工艺的器件，比较的这三个电参数的退化特性有区别的原因是宽长比的差别. 对于第一组器件，其宽长比 $W/L=5.0/0.35$，第二组器件宽长比为 5.0/0.25. 相同工艺下，不同的宽长比引起的边缘效应有差别，正如我们的实验表现出来的一样. 综合这三个表征器件抗辐照特性的电参数，作者认为，在宽度 W 一样，而长度 L 不同的条件下，抗辐射总剂量效应呈现了一定规律性的变化. 是否采用不同的宽长比，也是深亚微米器件本身的加固方式，是我们下一步研究的目标.

4　相关机理研究与分析

从以上分析可知，对于深亚微米器件，影响辐射总剂量效应的已经不再是常规认识中的氧化层陷阱电荷和界面陷阱，而是与隔离有关的场氧化层变成了主要因素. 场氧化层中的陷阱电荷，特别是浅能级陷阱电荷 E'_δ 中心成为深亚微米器件辐射效应的主要来源.

图 4 给出了由场氧隔离的 nMOS 晶体管的截面图. 如图所示，场氧化层用来确定晶体管的沟道区域和实现集成电路中晶体管间的隔离. 在栅和场氧的过渡区，在场氧化层中产生了一个与栅氧化层平行的寄生场氧化层晶体管. 因为场氧化层的厚度比较大，辐射产生的电荷陷阱可以在寄生晶体管中产生大的阈值电压漂移，当器件处于关态时，在源-漏之间引起泄漏电流的产生. 场氧化层泄漏也可以在 n 沟晶体管的源区或漏区和 p 沟晶体管的 n 阱中产生. 场氧化层泄漏包括信号变坏，噪声差额减小，内部电势降落，功率输入电流增加和功能失效. 辐射产生的边缘泄漏电流对于 n 沟 MOSFET 而言极为重要，因为净正陷阱电荷很容易使 p 型衬底反型.

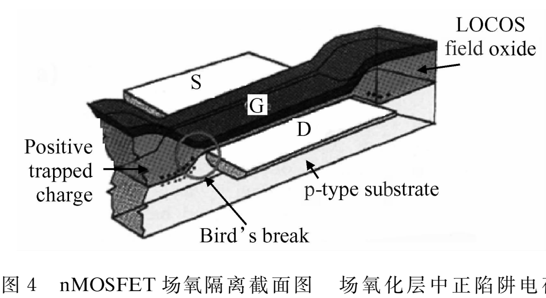

图 4　nMOSFET 场氧隔离截面图　场氧化层中正陷阱电荷会引起关态泄漏电流沿沟道边界流动.

Fig.4　Cross-section of an n-channel MOSFET isolated by a field oxide

为了进一步说明此推论，我们用器件仿真软件 ISE TCAD 对 0.25μm 器件进行仿真. 仿真分两组进行：第一组为单个理想器件，不加场氧隔离，模型中辐照引入的陷阱只考虑传统的氧化层陷阱和界面态；第二组为考虑场氧隔离的器件，仿真过程中，考虑到场氧化层中的陷阱电荷. 在模型中加入了由辐

照引起的场氧化层中浅能级的陷阱电荷.由于场氧化层和栅氧化层在工艺中生长的方式是不一样的,再加之场氧化层和栅氧化层在器件中承担的不同的角色,在确定器件结构时栅氧化层和场氧化层都采用 SiO_2,但是与热生长得到的栅氧化层不同的是,生长场氧化层采用的是淀积技术.尽管工艺不同,采用的具体淀积方式不一样,但是淀积生成的场氧化层厚度大,对辐射很敏感,而且控制陷阱的能力也比栅氧化层弱.

图 5 和图 6 给出了软件仿真的曲线.图 5 为理想器件模型随辐射总剂量增加的 *I-V* 特性曲线.图 6 则是增加场氧隔离的器件模型随总剂量增加的 *I-V* 特性变化曲线.从图 5 中可以看出,对于不加场氧隔离的理想器件,辐射总剂量小于 1Mrad(Si)关态泄漏电流很小,只有 10^{-15}A,比实验数据小很多.当总剂量达到 2Mrad(Si)后,关态泄漏电流才有明显的增加,直到总剂量加到 10Mrad(Si)后,达到 10^{-11}A,基本与辐照前关态泄漏电流的实验数据一致.即理想器件模型的关态泄漏电流比实验数据要小得多.而图 6 中给出的考虑场氧化层中陷阱之后测量的关态泄漏电流基本上与实验数据保持一致,如图 7 所示.

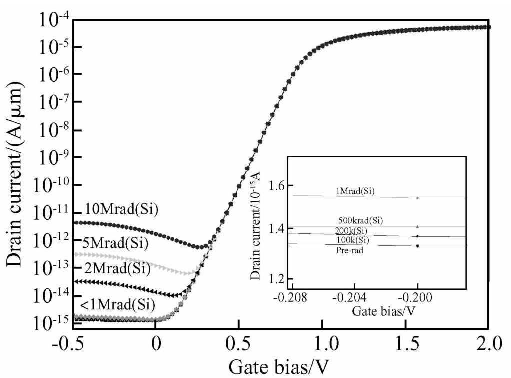

图 5 仿真理想器件模型的 *I-V* 特性曲线

Fig.5 *I-V* character curves of simulated ideal devices

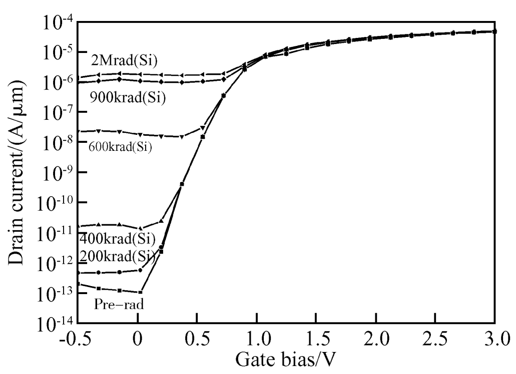

图 6 加场氧隔离的仿真器件模型的 *I-V* 特性曲线

Fig.6 *I-V* character curves of simulated adding field oxide isolation

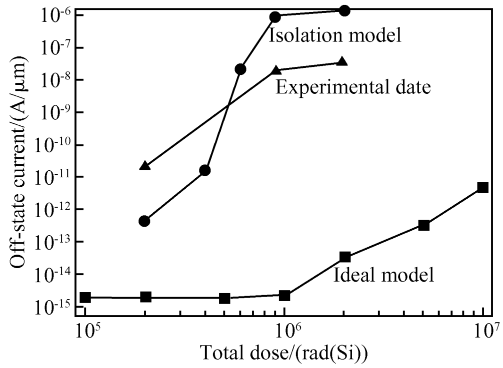

图 7 两种仿真模型与实验的关态泄漏电流随辐射总剂量的变化曲线

Fig.7 Off-state current curves dependence of total dose for the simulated and experimental devices

由这三个图可以看出,第一组理想器件的关态泄漏电流的仿真结果比第二组的要小得多,则证明在 0.25μm 标准工艺下,传统的陷阱电荷包括氧化层陷阱电荷和界面陷阱的影响可以忽略,在深亚微米器件中起主要作用的是场氧化层中的陷阱电荷,特别是浅能级陷阱电荷 E_δ' 中心,从而证明本文对实验数据的解释.

5 结论

本文通过对 0.25μm 标准工艺下选取的两组器件进行辐射总剂量效应实验,比较了关态泄漏电流、跨导和栅电流等电特性参数,得出了在深亚微米阶段,影响器件辐射效应的主要原因是场氧化层中的陷阱电荷,大尺寸器件中产生辐射效应的主要因素界面陷阱和氧化层陷阱已经变得不再突出,而原来不突出的场氧化层中陷阱电荷成为主要因素.场氧化层中的陷阱电荷,特别是浅能级陷阱电荷 E_δ' 中心成为深亚微米器件辐射效应的主要来源.本文通过 ISE TCAD 软件仿真,证明了本文对深亚微米器件辐射机理的解释.

由于本文选取的两组器件宽长比有一定的规律,本文的实验也显示出对于不同宽长比的深亚微米器件,其抗辐照特性呈现出某些规律性的变化.所以,对于深亚微米器件,采用不同的宽长比是否也是本身加固的一种方式将是我们以后研究的方向.

致谢 感谢信息产业部 5 所在实验方面给与的支持和帮助;本文实验样品是在 TSMC 加工获得的.

参考文献

[1] Ma T P, Dressendorfer P V. Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits. New York: Wiley-Interscience,

1989
[2] Re V, Manghisoni M, Ratti L, et al. Total ionizing dose effects on the noise performance of a 0.13μm CMOS technology. IEEE Trans Nucl Sci, 2005, 50(3): 1599
[3] Witczak S C, Lacoe R C, Osborn J V, et al. Dose-rate sensitivity of modern nMOSFETs. IEEE Trans Nucl Sci, 2005, 52(6): 2602
[4] Cester A, Geradin S, Paccadnella A, et al. Drain current decreas in MOSFETs after heavy ion irradiation. IEEE Trans Nucl Sci, 2004, 51(6): 3150
[5] Turowski M, Raman A, Schrimpf R D, et al. Total-dose-induced charge distribution in shallow-trench isolation oxides. IEEE Trans Nucl Sci, 2004, 51(6): 3166
[6] Shaneyfelt M R, Dodd P E, Draper B L, et al. Challenges in hardening technologies using shallow-trench isolation. IEEE Trans Nucl Sci, 1998, 45(6): 2548
[7] Johnston A H. Radiation effects in advanced microelectronics technologies. IEEE Trans Nucl Sci, 1998, 45(3): 1339
[8] Hughes H L, Benedetto J M. Radiation effects and hardening of MOS technology: devices and circuits. IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2005: 122

Total Ionizing Dose Effects of Deep Submicron nMOSFET Devices*

Meng Zhiqin, Hao Yue†, Tang Yu, Ma Xiaohua, Zhu Zhiwei, and Li Yongkun

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

Abstract: We study the total ionizing dose sensitivity of 0.25μm nMOSFETs. The off-state leakage current, transconductance, and the gate leakage current of the devices are monitored. Experiment shows that the effect on irradiation is mostly caused by the space charges in the field oxide, which is verified by simulation.

Key words: X-ray; irradiation; total dose effect; off-state leakage current
EEACC: 2560
Article ID: 0253-4177(2007)02-0241-05

---

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60376024)
† Corresponding author. Email: yhao@xidian.edu.cn
Received 25 August 2006, revised manuscript received 11 October 2006