

0.18 μm MOSFET 器件的总剂量辐照效应*刘张李^{1)2)†} 胡志远¹⁾²⁾ 张正选¹⁾ 邵华¹⁾ 宁冰旭¹⁾²⁾ 毕大炜¹⁾ 陈明¹⁾²⁾ 邹世昌¹⁾

1)(中国科学院上海微系统与信息技术研究所,信息功能材料国家重点实验室,上海 200050)

2)(中国科学院研究生院,北京 100039)

(2010年12月13日收到;2011年2月15日收到修改稿)

对 0.18 μm metal-oxide-semiconductor field-effect-transistor (MOSFET) 器件进行 γ 射线辐照实验,讨论分析器件辐照前后关态漏电流、阈值电压、跨导、栅电流、亚阈值斜率等特性参数的变化,研究深亚微米器件的总剂量效应. 通过在隔离氧化物中引入等效陷阱电荷,三维模拟结果与实验结果符合很好. 深亚微米器件栅氧化层对总剂量辐照不敏感,浅沟槽隔离氧化物是导致器件性能退化的主要因素.

关键词: 总剂量效应, 浅沟槽隔离, 氧化层陷阱正电荷, MOSFET

PACS: 61.80.Ed, 77.84.Bw, 85.30.Tv

1. 引言

空间环境、工艺制造环境等产生的辐射对电子器件及电路产生损伤,最终将导致器件和电路的失效. 集成电路工艺迅速发展,器件的辐射效应备受关注. 众所周知,总剂量效应主要是在二氧化硅中产生缺陷和陷阱电荷^[1]. 辐照在二氧化硅中激发出电子空穴对,电子很快迁移出二氧化硅,而空穴则一部分迁移出二氧化硅,一部分被二氧化硅中的空穴陷阱俘获成为正的陷阱电荷. 由于辐照时所加正偏压的作用这些陷阱电荷比较多的集中在硅和二氧化硅界面附近. 对大尺寸器件而言,辐射在较厚栅氧化层引入陷阱正电荷和界面态,导致 MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect-transistor) 阈值电压负向漂移,从而使器件性能退化. 国内对大尺寸器件的剂量率和温度对辐照效应的影响、电离效应建模进行了研究^[2,3]. 当器件尺寸达到深亚微米时,浅沟槽隔离替代场氧隔离成为主流的隔离氧化物. 厚的隔离氧化物(几百个 nm)在器件的总剂量效应中起着至关重要的作用^[4,5]. 国内对深亚微米 MOSFET 的总剂量效应已经开展一些研究. 文献[6]主要研究了 0.25 μm MOSFET 的总剂量效应,

但仍是场氧隔离;文献[7]对 0.18 μm MOSFET 的辐照效应进行模拟,但缺乏实验数据.

本文中,我们以 0.18 μm MOSFET 为研究对象,通过对器件辐照前后关态漏电流、阈值电压、栅电流、跨导和亚阈值斜率等特性参数的分析,研究深亚微米器件的辐照效应. 通过分析研究可以区分栅氧化层和浅沟槽隔离氧化物在器件总剂量效应中所起的不同作用.

2. 辐照实验

实验样品为 0.18 μm 工艺 MOSFET,器件尺寸宽长比为 $W/L = 10 \mu\text{m}/0.18 \mu\text{m}$,栅氧化层厚度为 3 nm,隔离层采用浅沟槽隔离,厚度约为 390 nm,工作电压为 1.8 V. 辐照偏置条件主要选取最恶劣偏置状态:ON 偏置,即栅压为 1.8 V,漏极、源极和衬底接地. 实验中还选择栅压为 0.9 V 和 0 V 做比较研究. 测试器件辐照前后线性区电流电压曲线,漏端电压为 0.05 V. 器件栅氧化层很薄,容易击穿,测试过程中监测栅极电流大小,确保器件正常工作. 器件辐照实验用中国科学院新疆理化技术研究所 ^{60}Co γ 射线辐照,剂量率为 200 rad(Si)/s. 选取的总剂量点为 100, 200, 300, 400, 500 krad(Si) (1 rad =

* 中国科学院微小卫星重点实验室开放基金资助的课题.

† E-mail: liuzhangli@mail.sim.ac.cn

10^{-2} Gy), 达到设定剂量点移位测试曲线.

3. 结果与分析

3.1. 实验结果

图1为MOSFET在不同总剂量下电流电压特性曲线. 从图中可以看出, 随着总剂量的增加, 器件漏电流增加. 在剂量为100 krad(Si)时, 器件曲线变化很小, 说明该器件在100 krad(Si)仍能保持很好的电学特性, 器件能承受的总剂量在100 krad(Si)以上. 当总剂量达到500 krad(Si)时, 器件的漏电流达到 10^{-7} A, 比辐照前的漏电流 10^{-12} A高出5个数量级. 在该剂量下, 器件无法正常关断, 将导致功能失效、静态功耗增加.

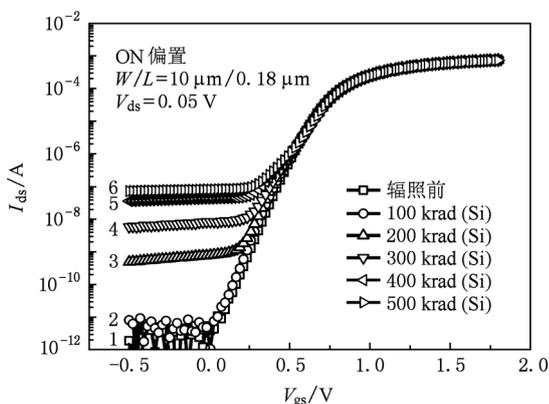


图1 MOSFET 辐照前后电流电压曲线, I_{ds} 为 MOSFET 漏极至源极电流, V_{gs} 为栅极扫描电压

3.2. 分析讨论

通过恒定电流法提取出 MOSFET 不同总剂量下的阈值电压, 如图2所示. 从图中可以看到, 器件的阈值电压几乎不随总剂量变化. 实验器件的栅氧化层为3 nm, 辐照在薄的氧化层中引入陷阱正电荷, 会通过栅极和衬底的电子隧穿得到补偿^[8]. 我们也比较研究了辐照前后栅电流和跨导的变化. 图3所示为不同总剂量下器件的栅极电流. 从图中可以看出, 栅极电流只有 10^{-11} — 10^{-10} A, 且不随总剂量变化. 这说明, 实验器件功能正常, 且栅氧化物对总剂量不敏感. 图4所示为不同总剂量下器件跨导随栅极扫描电压变化曲线. 辐照前后, 跨导几乎不变, 这说明该器件的迁移率没有发生明显变化, 辐照过程中没有产生明显的界面态. 因此, 对深亚微

米器件而言, 薄的栅氧化层对总剂量辐照不敏感.

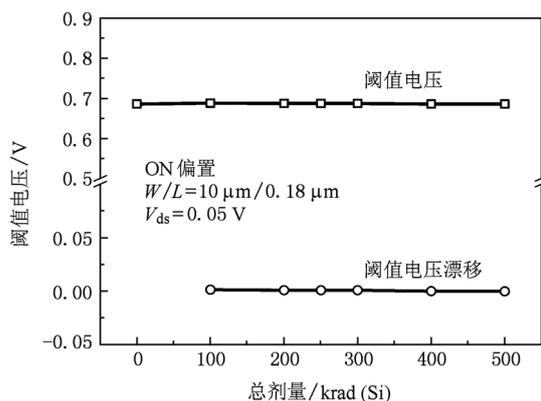


图2 MOSFET 阈值电压随总剂量变化曲线, V_{ds} 为漏极电压

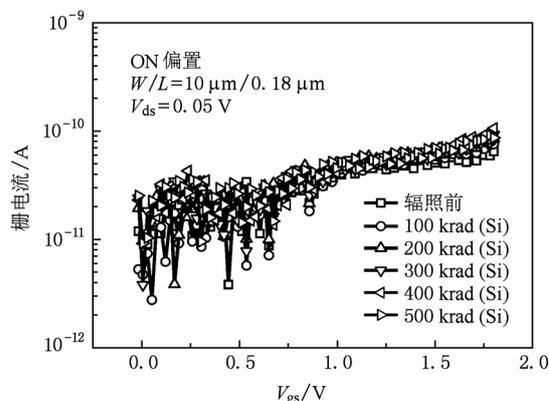


图3 MOSFET 栅电流随总剂量变化曲线

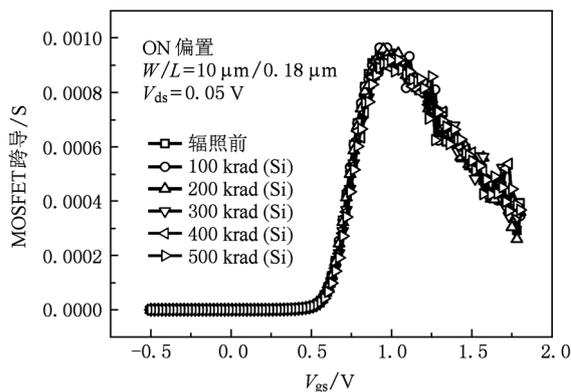


图4 不同总剂量 MOSFET 跨导随 V_{gs} 变化曲线

定义器件在栅电压为0 V时对应的漏端电流为关态漏电流^[9]. 图5所示为提取的MOSFET不同总剂量下关态漏电流. 我们可以看到, 漏电流随总剂量非线性增加, 达到某一剂量值时才产生漏电流,

这说明只有辐照诱生的氧化物陷阱正电荷足够多时,才能形成漏电路径.

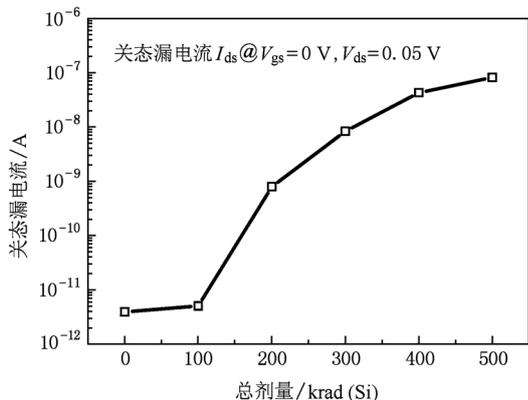


图5 MOSFET 关态漏电流随总剂量变化曲线

众所周知, MOSFET 器件对总剂量辐照敏感的包括栅氧化层和浅沟槽隔离氧化物. 隔离氧化物厚度远大于栅氧, 它将成为器件总剂量辐射响应的关键. 图6所示为浅沟槽隔离器件的总剂量辐射效应示意图. 当器件被辐照时, 在浅沟槽隔离氧化物中产生了大量的电子空穴对, 在经过初始的复合后, 在电场的作用下, 电子被快速地扫出氧化层, 而经复合后剩下的空穴则要向界面运动, 在运动过程中, 一部分穿越界面进入衬底, 另一部分被氧化物陷阱所俘获, 形成氧化物陷阱正电荷^[10]. MOSFET 可以看成正常条件下的主晶体管和两个浅沟槽隔离氧化物寄生晶体管组成. 寄生晶体管的阈值电压随总剂量增加迅速降低. 随着总剂量的增加, 正电荷数量增加, 导致衬底耗尽甚至反型, 从而在源极和漏极之间形成漏电路径.

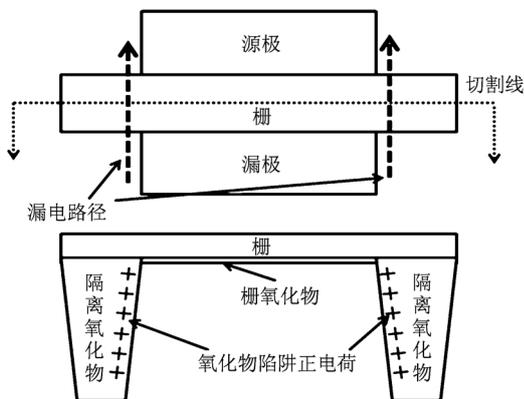


图6 MOSFET 辐照后漏电路径示意图

采用在半对数坐标中对亚阈值电流进行直线

拟合提取斜率的方法求得器件的亚阈值斜率, 如图7所示. MOSFET 的亚阈值斜率反映器件关断的难易程度. 随着总剂量增加, 亚阈值斜率变大, 说明器件的开关特性变差. 由前面讨论可知, 器件的阈值电压和跨导都不随总剂量变化, 说明栅氧化层对总剂量不敏感, 不会引起器件性能的退化. 我们认为, 亚阈值斜率的变化是由于寄生晶体管的开启造成的. 寄生晶体管引入的额外漏电流叠加到主晶体管的亚阈值区电流, 使得晶体管亚阈值区电流增加, 特性变差.

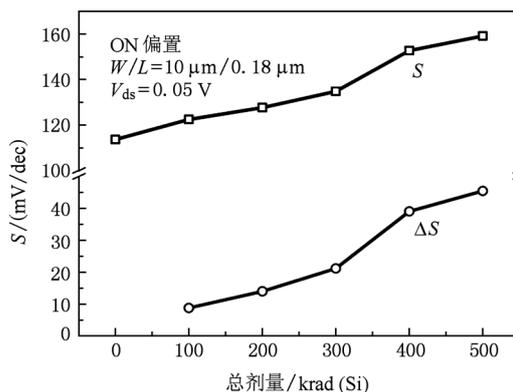


图7 MOSFET 亚阈值斜率随总剂量变化曲线

对应于不同的辐照栅电压偏置条件, 器件的关态漏电流随总剂量变化关系如图8所示. 辐照时栅电压为 1.8 V 条件下器件的关态漏电流增加最明显, 0 V 条件下关态漏电流在 500 krad (Si) 总剂量下几乎不变. 总剂量辐照在氧化物中产生电子-空穴对, 电荷的分离效率与电场直接相关^[1]. 电路在实际操作过程中, 栅电压会不断变换, 并不一定维持在电源电压, 所以, 最恶劣辐照偏置条件将会在一定程度上低估器件的耐辐射能力.

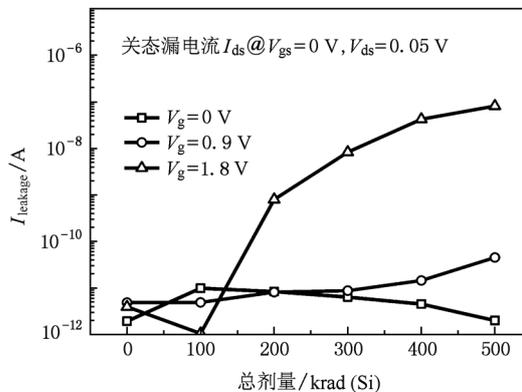


图8 不同栅电压偏置下器件的关态漏电流随总剂量变化曲线

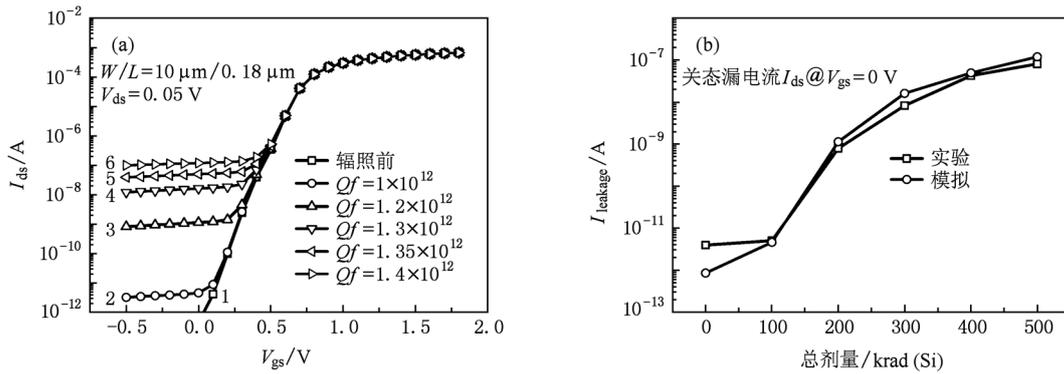


图9 (a)总剂量效应模拟结果;(b)关态漏电流模拟结果与实验结果对照

3.3. 理论模拟

通过以上分析讨论可知,隔离氧化物是影响深亚微米器件的总剂量效应的主要部分. 我们用三维器件模拟来理解器件的总剂量效应. 模拟采用 Silvaco 软件. 选取传统漂移-扩散模型来模拟载流子的输运过程, Shockley-Read-Hall (SRH) 模型模拟载流子的产生、复合, 平行电场依赖 (FLDMOB) 模型模拟速度饱和和效应. 器件网格结构通过工艺模拟获得, 相关工艺参数由工艺厂商提供. 辐照响应模拟过程中, 薄的栅氧化层中不引入界面电荷, 而在浅沟槽隔离氧化物与衬底交接的侧壁引入一定量界面正电荷, 等效辐射在氧化物中引入的陷阱正电荷^[11], 氧化物中引入的陷阱正电荷数量和模拟结果如图 9 所示. 陷阱正电荷数量 (Q_f) 与相关文献量级一致^[12]. 从图中可以看出, 在浅沟槽氧化物侧壁加载的界面电荷作用下, 器件漏电流明显增加. 辐照在浅沟槽隔离氧化物引入的陷阱正电荷, 引起衬底耗尽甚至反型, 形成漏极至源极的漏电路径, 是导致器件漏电的主要原因. 如图 9(b) 所示, 模拟得到的器件关态漏电流与实验结果吻合较好. 一般地, 衬底掺杂浓度越高, 则更难反型, 因此提高浅沟槽

隔离氧化物侧壁衬底的掺杂浓度能够提高器件的耐总剂量辐照能力.

4. 结 论

通过以上对深亚微米器件总剂量辐射效应的讨论分析, 可以得到如下结论:

1. 深亚微米器件薄的栅氧化层对总剂量辐照不敏感, 阈值电压、跨导和栅极电流几乎不随总剂量变化;
2. 在总剂量辐射下, 浅沟槽隔离氧化物是造成器件性能退化的主要因素, 器件的关态漏电流和亚阈值斜率增加, 器件不能正常关断, 导致功能失效、静态功耗增加;
3. 栅电压偏置条件对器件的总剂量辐照效应影响很大, 栅电压偏置越高, 电场越大, 器件性能退化越严重;
4. 通过在浅沟槽隔离氧化加载常量电荷的方法, 模拟结果与实验结果吻合较好, 该方法可以有效分析深亚微米器件的总剂量效应.

感谢中国科学院新疆理化技术研究所同仁的辐照实验和建议讨论.

[1] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Fleetwood D M, Felix J A, Dodd P E, Paillet P, Ferlet-Cavrois V 2008 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **55** 1833
 [2] Zhang T Q, Liu C Y, Liu J L, Wang J P, Huang Z, Xu N J, He B P, Peng H L, Yao Y J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 3434 (in Chinese) [张廷庆、刘传洋、刘家璐、王剑屏、黄智、徐娜军、何宝平、彭宏论、姚育娟 2001 物理学报 **50** 2434]
 [3] Chen W H, Du L, Zhuang Y Q, Bao J L, He L, Zhang T F,

Zhang X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4090 (in Chinese) [陈伟华、杜磊、庄奕琪、包军林、何亮、张天福、张雪 2009 物理学报 **58** 4090]
 [4] Esqueda I S, Barnaby H J, Alles L M 2005 *IEEE Trans. on Nuc. Sci.* **52** 2259
 [5] Faccio F, Barnaby H J, Chen X J, Fleetwood D M, Gonella L, McLain M, Schrimpf R D 2008 *Microelect. Reliab.* **48** 1000
 [6] Meng Z Q, Hao Y, Tang Y, Ma X H, Zhu Z W, Li Y K 2007

- Chin. J. Semicond.* **28** 241 (in Chinese) [孟志琴、郝跃、唐瑜、马晓华、朱志炜、李永坤 2007 半导体学报 **28** 241]
- [7] Wang S H, Lu Q, Wang W H, An X, Huang R 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1970 (in Chinese) [王思浩、鲁庆、王文华、安霞、黄如 2010 物理学报 **59** 1970]
- [8] Benedetto J M, Boesch H E, McLean F B, Mize J P 1985 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **32** 3916
- [9] Barnaby H J 2006 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **53** 3103
- [10] Gonella L, Faccio F, Silvestri M, Gerardin S, Pantano D, Re V, Manghisoni M, Ratti L, Ranieri A 2007 *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* **582** 750
- [11] Yo G U, Khare P S, Schrimpf R D, Massengill L W, Galloway K F 1999 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **46** 1830
- [12] Turowski M, Raman A, Schrimpf R D 2004 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **51** 3166

Total ionizing dose effect of 0.18 μm nMOSFETs*

Liu Zhang-Li^{1)2)†} Hu Zhi-Yuan¹⁾²⁾ Zhang Zheng-Xuan¹⁾ Shao Hua¹⁾ Ning Bing-Xu¹⁾²⁾
Bi Da-Wei¹⁾ Chen Ming¹⁾²⁾ Zou Shi-Chang¹⁾

1) (The State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

2) (Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(Received 13 December 2010; revised manuscript received 15 February 2011)

Abstract

A 0.18 μm MOSFET with shallow trench isolation is exposed to a γ -ray radiation. The parameters such as off-state leakage current, threshold voltage, transconductance, gate leakage current, and subthreshold slope are analyzed for pre- and post-irradiation. By introducing constant sheet charges at the shallow trench isolation oxide sidewall, good agreement between 3D simulation and experiment result is demonstrated. We believe that the thin gate oxide is insensitive to radiation, and the radiation induced charge trapping in the shallow trench isolation still leads to macroscopic effects such as drain-to-source leakage current, ultimately limiting the tolerance of CMOS circuits.

Keywords: total ionizing dose, shallow trench isolation, oxide trapped charge, MOSFET

PACS: 61.80. Ed, 77.84. Bw, 85.30. Tv

* Project supported by the Open Fund of the Key Laboratory of Microsatellites, Chinese Academy of Science of China.

† E-mail: liuzhangli@mail.sim.ac.cn