

高剂量辐照条件下的 MOSFET 总剂量 辐照效应模型^{*}

万新恒 张 兴 高文钰 黄 如 王阳元

(北京大学微电子学研究所, 北京 100871)

摘要: 报道了一种用于在高剂量辐照条件下 MOS 器件抗辐照电路模拟的半经验模型。利用该模型对 MOS 器件实验结果进行了模拟, 模型计算结果与实验吻合较好。初步分析了高剂量条件下不同散射机制对模拟结果的影响, 结果表明界面电荷的库仑散射是引起电子迁移率退化的主要机制。

关键词: MOSFET; 总剂量辐照效应; 高剂量; 模型

EEACC: 2560R; 7420; 0170N

中图分类号: TN 386 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2001)10-1325-04

1 引言

近三十年来, 国际上对于体硅材料及 MOSFET 的辐照效应进行了大量的研究, 大多集中于加固工艺和辐照试验方面, 在辐照机理和模拟方面的研究还不很多^[1-6]。目前, 适用于实际电路模拟的辐照效应模型还很少, 典型的有 BERT^[3]。已有的模型大多仅适用于低剂量辐照条件^[3-5] (辐照剂量 $< 5 \times 10^3 \text{ Gy(Si)}$), 不能满足空间环境和军事电子等领域高剂量辐照条件下的实际需要。例如, 一个地球卫星中的电子系统每年所接收的累计辐射剂量可达 100Gy(Si) 以上, 对于暴露于表面的元器件则更高^[5]。

随着 VLSI 的不断发展, 对一些新材料、新器件和新系统(如 SOI MOSFET 及 MEMS 等)辐照效应的研究也方兴未艾^[7-9], 迫切需要在辐照条件(包括高剂量)下适用于电路模拟的器件模型, 以指导抗辐照器件与电路的设计。

基于上述考虑, 本文首先报道了一种适用于在

高剂量辐照条件下 MOS 器件抗辐照电路模拟的半经验模型。利用该模型对 MOS 器件高剂量辐照实验结果进行了模拟, 模型计算结果与实验吻合较好。该模型物理意义明确, 参数提取方便, 适合于 MOS 器件高剂量辐照效应的电路模拟。

2 模型建立

沟道区内的载流子受界面电荷、表面粗糙度以及晶格和离化杂质原子散射的影响, 与 Si-SiO₂ 的界面状况和工艺过程有很大关系。在辐照环境下, 表面沟道迁移率受辐照感生氧化层陷阱电荷以及界面态电荷分布的影响, 导致平带电压变化和反型层载流子密度下降。反型层载流子密度下降, 影响声子散射和表面电场的散射作用, 从而导致表面沟道迁移率下降。

根据 Jeon 和 Burk 提出的半经验模型^[10], 主要考虑三种散射机制(库仑散射、声子散射和表面电场决定的散射作用), 则辐照后的表面沟道迁移率由 Matthiessen 定律得到:

* 高等学校博士学科点专项科研基金和国家重点基础研究资助项目(No. G2000036503)。

万新恒 男, 1972 年出生, 博士研究生, 主要从事薄栅介质辐照效应及 SOI 器件可靠性方面的研究。

张 兴 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 主要从事纳米半导体器件及其制备、SOI 技术、抗辐照加固技术等方面的研究。

高文钰 男, 1964 年出生, 博士后, 从事 VLSI 工艺和器件可靠性研究。

2000-11-20 收到, 2001-03-09 定稿

©2001 中国电子学会

$$\frac{1}{\mu_r} = \frac{1}{\mu_{rox}} + \frac{1}{\mu_{rit}} = \frac{1 + b_1 \Delta n_{ot}}{\mu_0} + \frac{1 + b_2 \Delta n_{it}}{\mu_0}$$

$$= \left[\frac{a_1}{T} + a_2 T^\gamma E_{eff}^{1/\gamma} + a_3 E_{eff}^2 \right]^{-1} (2 + b_1 \Delta n_{ot} + b_2 \Delta n_{it}) \quad (1)$$

其中 μ_{rox} 为辐照感生氧化层陷阱电荷决定的有效迁移率; μ_{rit} 为辐照感生界面态电荷决定的有效迁移率; E_{eff} 为反型层有效电场; Δn_{ot} 和 Δn_{it} 分别为辐照导致的氧化层陷阱电荷以及界面态电荷分布的变化; a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 和 γ 为拟合参数。

若假设界面电荷的库仑散射是高剂量条件下引起电子迁移率退化的主要机制, 则表面沟道迁移率可表示为^[11]:

$$\mu_r = \frac{\mu_0}{\lambda(1 + E_s/E_{xc})} \quad (2)$$

$$\lambda = k D_n^\alpha \quad (3)$$

其中 μ_0 是低场迁移率; 临界电场 $E_{xc} = 6 \times 10^4 \text{ V/cm}$; α 和 k 均为拟合常数; D_n 为界面态密度; σ 为界面态俘获截面; 电场 E_s 可表示为^[12]:

$$E_s(y) = Q_s(y)/\epsilon_0 \epsilon_s$$

$$= C_{ox} [V_{GS} - V_T + V_{ox} - V(y)]/\epsilon_0 \epsilon_s \quad (4)$$

其中 V_T 为阈值电压; V_{GS} 为栅电压; V_{ox} 为栅氧化层上的电压降; C_{ox} 为单位面积的栅氧化层电容。

根据 Pao 和 Sah 提出的一维漏电流模型^[13]:

$$I_{DS} = - \frac{W}{L} \int_{V_{GS}}^{V_{DS}} \mu_r Q_n(\phi) d\phi \quad (5)$$

采用电荷薄层近似, 则^[13]:

$$Q_n = \gamma C_{ox} \left[\sqrt{\phi_s - u_t + e^{-\phi_s/u_t}} - f(\phi_s, \phi_t) \right] \quad (6)$$

$$f(\phi_s, \phi_t) = \left[\begin{array}{l} u_t e^{-\phi_s/u_t} + \phi_s - u_t + \dots \\ \dots + e^{-2\phi_s/u_t} (u_t e^{(\phi_s - \phi_t)} - \phi_s - u_t e^{-\phi_t/u_t}) \end{array} \right]^{1/2} \quad (7)$$

又:

$$\phi_s = V_G - \phi_{MS} + \frac{Q_{it}(\phi_s, \phi_t) + Q_{ot}}{C_{ox}} - \gamma f(\phi_s, \phi_t) \quad (8)$$

$$\gamma = \sqrt{2\epsilon_{Si} N_A / C_{ox}} \quad (9)$$

其中 u_t 为热电压; Q_{it} 和 Q_{ot} 分别为辐照导致的界面态陷阱电荷和氧化层陷阱电荷; ϕ 为表面势; ϕ_s 为空穴和电子准费米能级差; N_A 为衬底掺杂浓度。

将(1)式(或者(2)式)与(6)、(7)式一起代入(5)式, 最后通过对(5)和(8)式迭代求解, 采用数值方法可导出 MOSFET 在辐照条件下的漏电流。

该辐照模型同时考虑了漂移电流和扩散电流, 对包括亚阈值区和饱和区在内的所有工作区都有效。而且, 在不同的工作模式之间没有明显的界限, 器件从一种工作模式向另外一种工作模式的过渡是连续的。

3 模拟结果及讨论

下面利用上述模型对 Dentan^[14]、Siedle^[15] 和我们的高剂量辐照实验数据进行拟合。

对于辐照前的 MOSFET (如 $\lambda = 1$), μ_0 和 α 可通过对(5)式拟合得到, 如当 $t_{ox} = 84 \text{ nm}$ 时, 拟合得到 $\mu_0 = 1026 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, $\alpha_0 = 0.16$ 。

在高剂量条件下, 由于存在非均匀性的局域陷阱电荷^[6], 电场 E 在整个氧化层中是变化的。在高剂量辐照时, 如对 10 kGy 到 10 MGy 范围, λ 可通过对 MOSFET 转移特性辐照试验曲线^[14, 15]拟合得到如下经验式:

$$\lambda = \left[1 - \frac{a + b \ln(1 + D/D_0)}{c + dt_{ox}} \right] \ln \left[1 + \frac{D}{D_0} \right] \quad (10)$$

其中 D 为辐照剂量; $D_0 = 0.01 \text{ Gy(Si)}$; $a = -1.52 \times 10^{-3}$, $b = 1.33 \times 10^{-3}$, $c = 1.38$, $d = -4.1 \times 10^{-4}$ 。

图 1 为 NMOS 器件和 PMOS 器件的转移特性曲线随辐照剂量变化的实验数据^[14, 15]和模拟结果的比较。可见, 模拟结果和实验结果符合较好, 高剂量辐照条件下的最大误差小于 15%。因此, 上述模型能适用于高剂量辐照条件下的 MOSFET 电路模拟。

下面分析高剂量条件下不同散射机制对模拟结果的影响。图 2 为表面沟道迁移率随辐照总剂量的模拟曲线, 其中 f_{it} 为辐照产生的电子空穴对诱发界面态陷阱的比率。对于给定的 f_{it} , 随着辐照总剂量的增加, 表面沟道迁移率减小。对于给定的辐照总剂量, 随着 f_{it} 的增加, 表面沟道迁移率也相应减小。例如, 当 $f_{it} = 0.1$, 辐照剂量为 $1 \times 10^4 \text{ Gy(Si)}$ 时, 表面沟道迁移率较之辐照前下降约 80%。这可作如下解释: 当辐照剂量增加, 在 Si/SiO₂ 界面界面陷阱电荷也相应增加, 这又导致陷阱电荷中经过表面沟道的载流子表面散射的几率增加。

另外, 比较(1)与(2)式对 MOS 器件转移特性模拟结果的作用, 可以看出库仑散射的影响。图 3 为 NMOS 器件的转移特性曲线的实验数据同(1)、(2)式模拟所得结果的比较。可见, 在高剂量辐照条件

下,(1)与(2)式模拟所得结果基本相同,这表明与库仑散射相比,声子散射和表面电场决定的散射作用对MOS器件转移特性的影响不大,这也证实了由

(2)式导出模型的假设条件是合理的,即界面电荷的库仑散射是高剂量条件下引起电子迁移率退化的主要机制.

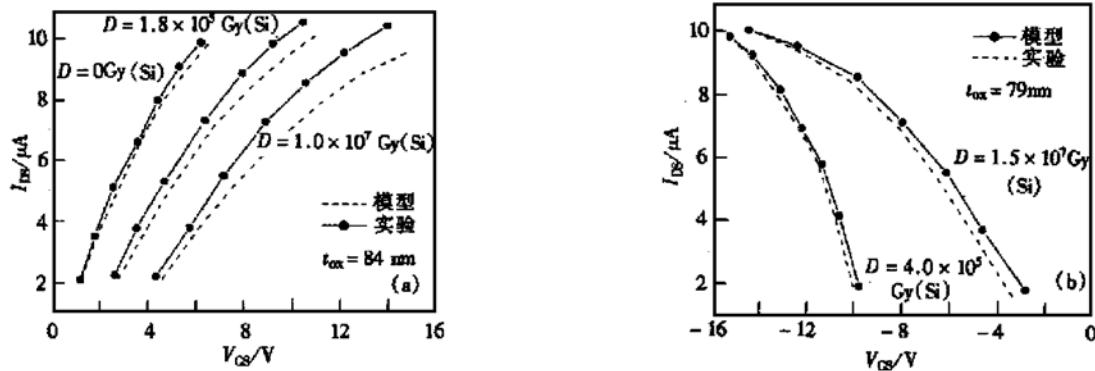


图1 MOS器件的转移特性曲线随辐照剂量变化的实验数据和模拟结果的比较 (a) NMOS器件; (b) PMOS器件

FIG. 1 Transfer Characteristics of Irradiated MOSFET's Experimental Data (Solid Line) and Computed Ones (Dashed Line) (a) NMOS; (b) PMOS

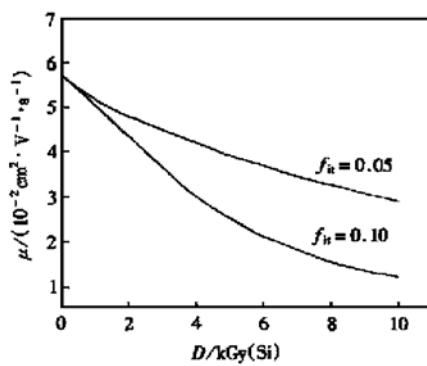


图2 表面沟道迁移率随辐照剂量的变化 其中 f_H 为辐照产生的电子空穴对诱发界面态陷阱的比率.

FIG. 2 Variation in Mobility of Surface Channel in Irradiating Conditions According to the Dose of Nuclear Radiation on the Device f_H is the interface trap charge generation efficiency.

4 结论

本文首先报道了一种适用于在高剂量辐照条件下MOS器件抗辐照电路模拟的半经验模型.利用该模型对MOS器件高剂量辐照实验结果进行了模拟,模型计算结果与实验吻合较好.该模型物理意义明确,适合于MOS器件高剂量辐照效应的电路模

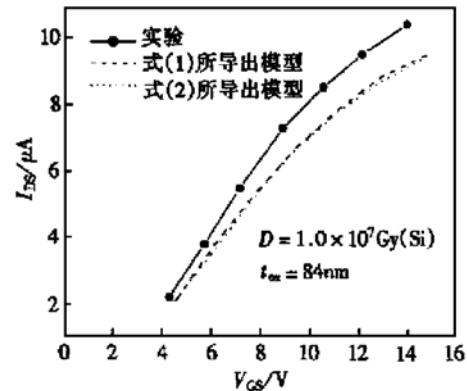


图3 NMOS器件的转移特性曲线的实验数据同(1)、(2)式导出模型所得结果的比较

FIG. 3 Comparison of Transfer Characteristics Between the NMOSFET Obtained from Experimental Data and Other Models Educed from Equations (1) and (2)

拟.通过分析高剂量条件下不同散射机制对模拟结果的影响,证实了界面电荷的库仑散射是高剂量条件下引起电子迁移率退化的主要机制.上述模型适用于长沟道MOS管,对短沟道MOS管需要修正.由此可以进一步地研究SOI MOSFET高剂量辐照效应模型,SOI器件与电路有关的工艺制备及辐照实验工作正在进行之中.

参考文献

- [1] T. P. Ma and P. V. Dressendorfer, Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits, A Wiley-Interscience Publication, 1989.
- [2] WAN Xin-heng, GAN Xue-wen, ZHANG Xing, HUANG Ru and WANG Yang-yuan, A Short-Channel SOI MOSFET Model Including Total Dose Effects, Chinese Journal of Semiconductors, 2001, **22**(9): 1154(in Chinese) [万新恒、甘学温、张兴、黄如、王阳元, 短沟道 SOI MOSFET 总剂量辐照效应模型, 半导体学报, 2001, **22**(9): 1154].
- [3] P. Pavan, R. H. Tu, E. R. Minami *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1994, **41**(6): 2619.
- [4] WAN Xin-heng, ZHANG Xing, HUANG Ru, GAN Xue-wen and WANG Yang-yuan, The Shift of Transitions Between Partially and Fully-Depleted Behavior in SOI MOSFET due to Radiation, Chinese Journal of Semiconductors, 2001, **22**(2): 358(in Chinese) [万新恒, 张兴, 黄如, 甘学温, 王阳元, SOI MOSFET 因辐照引起的部分耗尽与全耗尽过渡区的漂移, 半导体学报, 2001, **22**(2): 358].
- [5] LAI Zu-wu, Radiation Hardness Electronics: Radiation Effects and Hardening Techniques, Beijing: The National Defense Industry Press, 1998(in Chinese) [赖祖武主编, 抗辐射电子学: 辐射效应及加固原理, 北京: 国防工业出版社, 1998].

- [6] H. E. Boesch, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1986, **33**(6): 1191.
- [7] ZHANG Xing, HUANG Ru and WANG Yang-yuan, Chinese Journal of Semiconductors, 2000, **21**(5): 460(in Chinese) [张兴, 黄如, 王阳元, 半导体学报, 2000, **21**(5): 460].
- [8] R. Rios, R. K. Smeltzer, R. Amantea *et al.*, Solid-State Electronics, 1991, **34**(6): 853.
- [9] A. R. Knudson, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1996, **43**(6): 3122.
- [10] D. S. Jeon and D. E. Burk, IEEE Trans. Electron Devices., 1989, **36**(8): 1456.
- [11] J. H. Scofield, M. Trawick and P. Klimecky, Appl. Phys. Lett., 1991, **58**(24): 2782.
- [12] ZHANG Ping-ying and ZHOU You-mo, The Principle of Transistors, Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 1985(in Chinese) [张屏英, 周佑謨, 晶体管原理, 上海: 上海科学技术出版社, 1985].
- [13] H. C. Pao and C. T. Sah, Solid-State Electronics, 1966, **9**: 927.
- [14] M. Dentan, CERN/LHCC 98-37, ED 29 Final Status Report, 1998.
- [15] A. H. Siedle and L. Adams, Handbook of Radiation Effects, Oxford Science Publications, 1993.

A Phenomenological MOSFET Model Including Total Dose Radiation Effects at a High Total Dose^{*}

WAN Xin-heng, ZHANG Xing, GAO Wen-yu, HUANG Ru and WANG Yang-yuan

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: A phenomenological model is proposed to discuss the total dose radiation effects on MOS devices at a high total dose. The model is verified by the comparison results of the simulated and measured post-radiation device characteristics of MOSFETs. As a basic circuit simulation tool, it has proved useful to analyse the MOS transistors exposed to a nuclear environment with high radiations. In addition, the decrease in the electron mobility due to high dose irradiation is indicated to be caused mainly by the increase in Coulomb scattering of the interface charges with an increased density.

Key words: MOSFET; total dose radiation effects; high total dose; model

EEACC: 2560R; 7420; 0170N

Article ID: 0253-4177(2001) 10-1325-04

* Project Supported by the Doctoral Program Foundation of Institutes of Higher Education of China and by the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China (Grant No. G2000036503).

WAN Xin-heng male, was born in 1972. He is engaged in radiation effect on thin gate dielectricity and studying device reliability.

ZHANG Xing male, was born in 1965, professor. He is engaged in study of semiconductor device SOI technology, radiation hardness etc.

GAO Wen-yu male, was born in 1964. He is engaged in studying of VLSI technology and its reliability.