

非均匀沟道 MOS 辐照正空间电荷迁移率模型

李泽宏 李肇基 张波 方健

(电子科技大学微电子研究所, 成都 610054)

(2002 年 11 月 27 日收到 2003 年 5 月 25 日收到修改稿)

提出非均匀沟道 MOS 辐照正空间电荷迁移率模型. 借助镜像法导出沟道电离杂质与辐照正空间电荷的二维场和二维相互作用势的分布, 由此给出非均匀 n 沟和 p 沟的迁移率表示式, 其解析解与二维仿真值十分吻合. 还借助二维仿真器计算均匀沟道 MOS 辐照正空间电荷迁移率的变化值, 其值和文献 [2, 3] 实验数据一致.

关键词: 非均匀沟道 MOS, 镜像法, 二维相互作用势

PACC: 6180, 6185, 7340Q

1. 引言

迄今有较多学者深入地研究了低压均匀沟道 MOS 器件的电离辐照效应^[1-6], 提出了辐照阈值电压、辐照迁移率等模型. 由于高压 MOS 大都为非均匀掺杂沟道, 辐照对器件的性能影响与均匀沟道 MOS 有所不同. 现今对高压器件研究重点多集中在太空中应用时受高能粒子轰击的单粒子效应方面^[7], 而对电离辐照效应的研究较少. 由于高压 MOS 在太空中还会受到大量较低能量的离子或者射线的辐射, 其可靠性受到很大的影响. 因此, 研究高压 MOS 的电离辐照效应就具有重要的意义.

本文首先借助镜像法分析非均匀沟道 MOS 器件沟道中电离杂质和辐照正空间电荷的二维场及其作用, 给出了非均匀沟道 MOS 器件辐照电荷与沟道杂质的二维相互作用势, 提出非均匀沟道 MOS 辐照正空间电荷迁移率模型. 借助二维仿真器 MEDICI 模拟辐照迁移率的变化. 研究表明, 非均匀 n 沟和 p 沟 MOS 的辐照迁移率解析解和数值解非常吻合, 均匀沟道 MOS 迁移率的值和文献 [2, 3] 实验数据一致.

2. 理论分析

非均匀沟道 MOS 器件的沟道区杂质 $N_A(x, y)$ 分布由沟道和源区形成时杂质横向扩散的高斯分布和余误差分布的补偿来决定, 即

$$N_A(x, y) = N_b(x, y) - N_s(x, y),$$

式中 $N_b(x, y), N_s(x, y)$, 分别为沟道、源区扩散杂

质的分布.

图 1(a) 为无穷大的 Si 介质和有界的 SiO₂ 介质. 首先假设 SiO₂ 介质无界. 在 Si 中点 (x, y) 处体积 $\Delta V (\Delta V \rightarrow 0)$ 有电离杂质

$$Q(x, y) = qN_A(x, y)\Delta V.$$

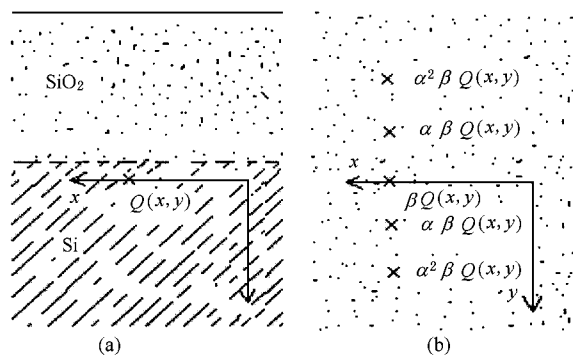


图 1 沟道下电离杂质及其镜像法

由镜像法^[8, 9]可求得 $Q(x, y)$ 在 SiO₂ 中产生的电场作用等效于无穷大 SiO₂ 介质中存在的另一系列电荷产生的电场, 其电荷量为 $\beta Q(x, y), \beta\alpha Q(x, y), \beta\alpha^2 Q(x, y), \dots$, 它们横坐标相同, 纵坐标分别为 $0, \pm 2y, \pm 4y, \dots$, 如图 1(b) 所示. 其中

$$\alpha = \frac{\epsilon_{Si} - \epsilon_{SiO_2}}{\epsilon_i}, \beta = \frac{2\epsilon_{SiO_2}}{\epsilon_i}, \epsilon_i = \epsilon_{SiO_2} + \epsilon_{Si}.$$

在 Si/SiO₂ 界面, 镜像电荷产生的电场切向分量及电通量密度法向分量是连续的. 因此, 在 Si 和 SiO₂ 介质中都满足 Laplace 方程. 点 (x, y) 处体积 ΔV 的电离杂质 $Q(x, y)$ 系列镜像电荷在 x 轴上任一点 x' 处的横向和纵向电场为

$$E_A(x) = \frac{\beta Q(x,y)}{2\pi\epsilon_{SiO_2}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n (x-x')}{((x-x')^2 + (2n+1)^2 y^2)^{\frac{3}{2}}},$$

$$E_A(y) = \frac{\beta Q(x,y)}{2\pi\epsilon_{SiO_2}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n (2n+1)y}{((x-x')^2 + (2n+1)^2 y^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (1)$$

由于 $\alpha \approx 0.5$, 无穷级数(1)式收敛很快, 可用 $n=0$ 的首项做近似. 因此, 即使在氧化层厚度和耗尽层宽度可比拟的情况下, 前述氧化层厚度为无穷大的假设都是正确的.

沟道区表面的扩散浓度 N_b 为 $1.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 结深为 $5.50 \mu\text{m}$; 源区表面的扩散浓度为 $1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 结深为 $1.50 \mu\text{m}$. 假设纵向为高斯分布, 横向为余误差分布. 由(1)式计算沟道下电离杂质二维电场分布和借助二维仿真器模拟得到的电场分布如图2所示. 在沟道边缘处由于宽度为 $0.122 \mu\text{m}$ 左右的源结耗尽层的存在, 沟道耗尽层中电离杂质的电场受到源区耗尽层电离杂质的作用, 沟道中电离杂质场在源结边缘处被抬高, 数值解比解析解略大. 但在离源结边界 $0.2 \mu\text{m}$ 左右, 数值解和解析解是一致的, 如图2所示.

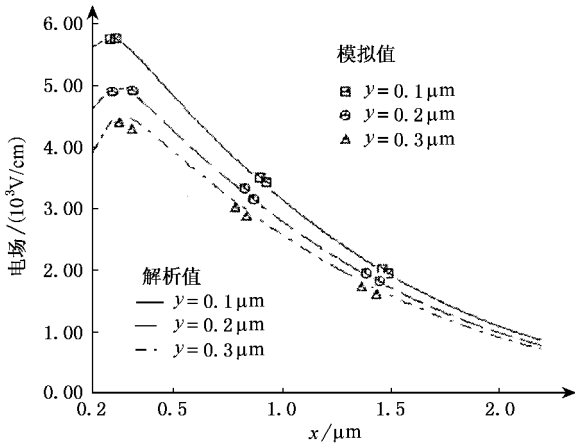


图2 非均匀沟道 MOS 器件沟道下电场的数值解和解析解

辐照下 MOS 器件的氧化层中有正空间电荷 qN_{ot} . Si/SiO₂ 界面有新界面态电荷 qN_{it} 产生, 使其阈值电压、迁移率等特征参数变化. 特别在高辐照剂量下引入大量的 N_{ot} 和 N_{it} 后, 对器件的参数有很大的影响. 本文只考虑辐照引入的正空间电荷对迁移率的影响. 假设均匀辐照情况下, 面积 ΔS ($\Delta S \rightarrow 0$) 俘获的正空间电荷 $Q_{ot} = qN_{ot}\Delta S$ 是均匀分布的. 同理, 借助镜像法分析辐照正空间电荷二维电场

$$E_{ot}(x) = \frac{\zeta Q_{ot}}{2\pi\epsilon_{Si}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\xi^n (x-x')}{((x-x')^2 + (2n+1)^2 t_{SiO_2}^2)^{\frac{3}{2}}},$$

$$E_{ot}(y) = \frac{\zeta Q_{ot}}{2\pi\epsilon_{Si}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\xi^n (2n+1)t_{SiO_2}}{((x-x')^2 + (2n+1)^2 t_{SiO_2}^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (2)$$

式中

$$\zeta = \frac{\epsilon_{SiO_2} - \epsilon_{Si}}{\epsilon_t}, \quad \xi = \frac{2\epsilon_{Si}}{\epsilon_t},$$

t_{SiO_2} 为氧化层厚度. 氧化层中辐照正空间电荷的分布是均匀的. 横向电场相互抵消(在边界处单位面积电荷横向电场是比较小的, 对器件参数影响很小, 故忽略). 因此, 正空间电荷横向总电场 $E_{ot,x} \approx 0$. 纵向 y 方向的电场是均匀分布的. 由于沟道杂质的不均匀分布, 电离杂质的二维电场分布也不均匀. 显然辐照正空间电荷与沟道电离杂质的电场二维作用是不均匀的. 因此, 本文引入二维相互作用势 $\Delta\psi$ 来描述两者相互作用的不均匀性, 即

$$\Delta\psi = \int_0^r f(E_{ot}, E_A(x,y)) dr, \quad (3)$$

式中 r 为电荷间相互作用距离, f 是二维相互作用场函数. 由(1)(2)式可定义 f 为一 g 函数

$$f(E_{ot}, E_A(x,y)) \equiv g(Q_{ot}, Q(x,y), x,y).$$

由于 MOS 器件最大耗尽层宽度在 $100\text{--}300 \text{ nm}$ ^[10], 远大于俘获正空间电荷在 Si/SiO₂ 界面附近 10 nm 左右^[11]. 在 y 方向的最大点可用最大耗尽层宽度近似. ϵ 用 ϵ_{Si} 来替代, 采用氢原子近似模型, 得到二维相互作用势为

$$\Delta\psi = \int_{1e-8}^{W_m} \int_0^{L_{eff}} \frac{1}{4\pi\epsilon_{Si}} \frac{N_{ot} q N_A(x,y) x}{y^2 L_{eff}} dx dy, \quad (4)$$

式中 W_m 为沟道下耗尽层最大宽度, L_{eff} 为有效沟道长度. 由(4)式计算得到相互作用势 $\Delta\psi$ 与沟道区表面扩散浓度 N_b , 辐照正空间电荷数量 N_{ot} 的关系如图3所示.

由图中可知, 随沟道掺杂浓度和辐照正空间电荷数量的增大, 相互作用势增强. 显然相互作用势对非均匀沟道 MOS 迁移率有影响. 我们在均匀沟道迁移率辐照变化的半经验公式的基础上, 提出了非均匀沟道辐照正空间电荷迁移率变化公式

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_0} = \frac{1}{1 + \alpha_{ot} N_{ot} + \alpha_{act} \Delta\psi}, \quad (5)$$

式中 μ_0 为无辐照时的沟道迁移率, μ_{eff} 为辐照沟道

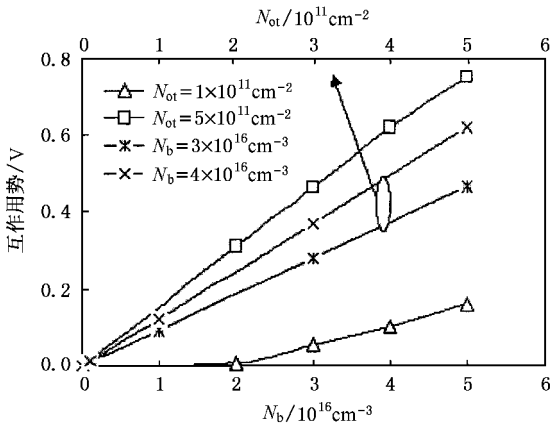


图 3 相互作用势 $\Delta\Psi$ 与辐照正空间电荷 N_{ot} 、沟道区表面扩散浓度 N_b 关系

迁移率 μ_{ot} 为辐照正空间电荷修正因子, α_{act} 是相互作用势修正因子。

3. 结果与讨论

以下所分析的器件参数为:沟道区表面的扩散浓度 N_b 为 $1.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 结深为 $5.50 \mu\text{m}$;源区表面的扩散浓度为 $1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 结深为 $1.50 \mu\text{m}$ 。首先讨论辐照正空间电荷和二维相互作用势对非均匀 n 沟 MOS 器件迁移率的影响。(5) 式中,若选取 $\alpha_{ot} = 2 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-2}$, $\alpha_{act} = -0.25 \text{ V}^{-1}$ 时,计算值如图 4 中线标为菱形的实曲线所示。当辐照引入的正空间电荷数量 $N_{ot} = 1.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时, μ_{eff}/μ_0 为 0.84。在辐照引入 N_{ot} 为 $5.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时,此时迁移率大小只有未受到辐照时器件迁移率的 54%。图 4 中还给出了二维数值计算结果,二维数值计算时考虑了辐照引入的正空间电荷的影响,比较两者可见,如果引入相互作用势,非均匀沟道的辐照正空间电荷迁移率变化计算值和二维仿真器 MEDICI 模拟值非常一致。从图中可知,在辐照下,当氧化层中俘获 N_{ot} 大于 $2.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时,载流子迁移率下降很快,辐照对迁移率的影响非常大。因此,研究非均匀沟道 MOS 的电离辐照效应具有重要的意义。若非均匀沟道 MOS 器件辐照迁移率的变化不考虑前述理论的相互作用势,即略去(5)式中 $\alpha_{act} \Delta\Psi$ 项,而仅考虑正空间电荷,选用不同的正空间电荷修正因子,得到迁移率变化如图 4 中线标为三角形和叉形的曲线所示。从图中可知,若不计及相互作用势项的影响,如 $\alpha_{ot} = 2 \times 10^{-12}$

cm^{-2} 时,迁移率变化率在 N_{ot} 较大时,解析值与模拟值有比较大的偏差。在 $\alpha_{ot} = 1.18 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-2}$ 时, N_{ot} 较小时偏差也比较大。因此,在分析非均匀沟道 MOS 器件正空间电荷迁移率的变化时必须考虑相互作用势对迁移率的影响。

由上分析,给出了非均匀 n 沟 MOS 器件辐照正空间电荷迁移率变化公式

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_0} = \frac{1}{1 + 2 \times 10^{-12} N_{ot} - 0.25 \Delta\Psi} \quad (6)$$

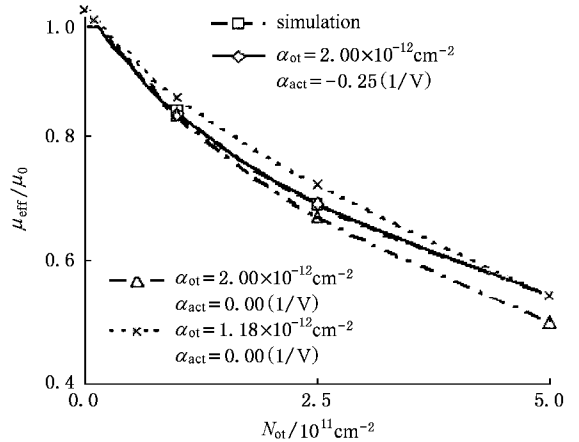


图 4 非均匀沟道辐照正空间电荷迁移率变化模拟值与计算值

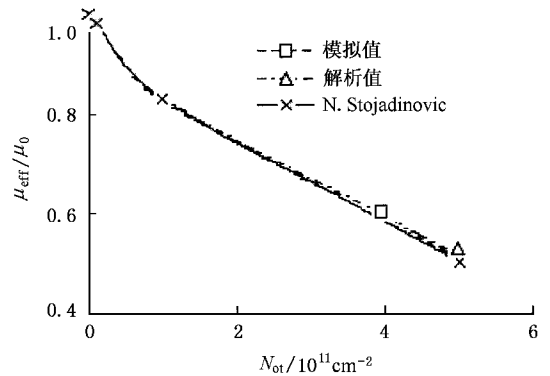


图 5 均匀沟道 MOS 辐照正空间电荷迁移率变化 MEDICI 模拟值、Stojadinovic 实验数据和经验公式计算值

对均匀 n 沟 MOS,文献 [2,3] 实验数据如图 5 中 Stojadinovic 曲线所示,当辐照引入的正空间电荷数量 N_{ot} 为 $5.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时,迁移率变化率为 0.50。二维数值计算结果如图中模拟值曲线所示。比较两者可知,均匀沟道 MOS 的辐照正空间电荷迁移率变化二维仿真器 MEDICI 模拟结果和文献 [2,3] 数据是一致的。(5) 式中若不考虑相互作用势,当选取 $\alpha_{ot} = 2 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-2}$ 时,计算值如图中所示。从图 5 中可知,

Stojadinovic, Golubovic 实验数据、模拟值与解析值是吻合的。

均匀和非均匀 p 沟 MOS 器件的辐照正空间电荷迁移率变化如图 6 所示。

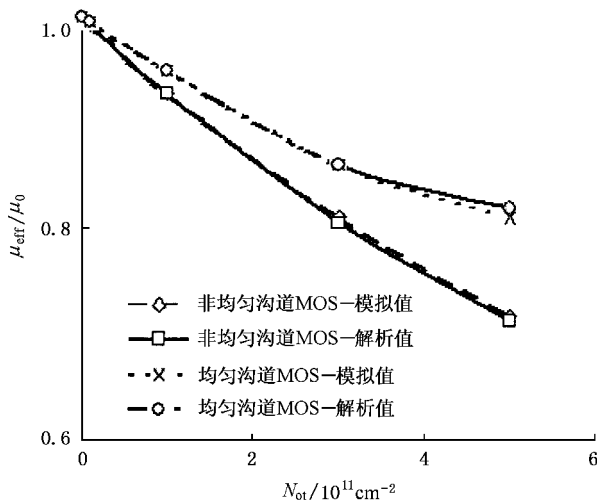


图 6 均匀、非均匀沟道 PMOS 辐照正空间电荷迁移率随正空间电荷 N_{ot} 变化率

当选取 $\alpha_{ot} = 5 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$, $\alpha_{act} = 0.232 \text{ V}^{-1}$ 时,非

均匀 p 沟 MOS 器件的辐照正空间电荷迁移率变化的解析值如图 6 中非均匀沟道 MOS-解析值的曲线所示.从图中可知,解析值和二维仿真器 MEDICI 模拟值一致.均匀沟道 PMOS 辐照正空间电荷迁移率解析值和二维仿真器 MEDICI 模拟值也吻合.我们得到了非均匀沟道 PMOS 器件辐照正空间电荷迁移率变化经验公式为

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_0} = \frac{1}{1 + 5 \times 10^{-13} N_{ot} + 0.232 \Delta \Psi} \quad (7)$$

4. 结 论

本文首先借助镜像法分析非均匀沟道辐照正空间电荷和沟道中电离杂质的二维场及其作用,给出了非均匀沟道 MOS 器件辐照正空间电荷与沟道杂质的二维相互作用势.提出非均匀沟道 MOS 辐照迁移率模型,给出了非均匀 n 沟和 p 沟的迁移率辐照正空间电荷的计算公式(6)和(7).通过仿真器 MEDICI 模拟辐照迁移率变化,非均匀沟道 MOS 的辐照迁移率解析解和数值解非常吻合,均匀沟道 MOS 迁移率变化值和文献 2,3 实验数据一致.

- [1] Sun S C and Plummer J D 1980 *IEEE Trans Electron Devices* **27** 1497
- [2] Stojadinovic N, Golubovic S, Davidovic V *et al* 1997 *Proc. 21 MIEL*, **1** 355
- [3] Dimitrijevic S, Stojadinovic N 1987 *Solid-State Electronics*, **30** 991
- [4] Fleetwood D M, Miller S L, Reber R A *et al* 1992 *IEEE Trans Nuclear Science* **39** 2192
- [5] Zhang T Q *et al* 2001 *Acta Phys. Sin* **50** 2434 [in Chinese] 张廷庆等 2001 *物理学报* **50** 2434]
- [6] He B P *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 188 [in Chinese] 何宝平等

2003 *物理学报* **52** 188]

- [7] Musseau O, Atorres, Campell A B *et al* 1999 *IEEE Trans Nuclear Science* **46** 1415
- [8] Chen X B 1963 *Acta of UESTC* **3** 76 [in Chinese] 陈星弼 1963 *成都电讯工程学院学报* **3** 76]
- [9] Chen X B 1986 *Acta Electronica SINICA* **1** 36 [in Chinese] 陈星弼 1986 *电子学报* **1** 36]
- [10] Sze S M 1981 *Physics of Semiconductor Devices* 263 - 264
- [11] Galloway K F, Schrimpf R D 1990 *Microelectronics Journal* **21** 67

Mobility model of nonuniform channel MOS by radiation induced positive spatial charge

Li Ze-Hong Li Zhao-Ji Zhang Bo Fan Jian

(*Institute of Microelectronics ,University of Electronic Science and Technology of China , Chengdu 610054 , China*)

(Received 27 November 2002 ; revised manuscript received 25 May 2003)

Abstract

In this paper we suggest a radiation mobility shift model for the nonuniform channel metal-oxide-semiconductor (MOS). The distribution of two-dimensional (2D)-electric field and 2D-interaction potential , which is caused by the interaction between the ionized impurity in the depletion layer and radiation-induced positive spatial charge , is analyzed by using image charge method. The mobility expression of n-type and p-type nonuniform channel MOS is proposed. Using 2D simulator MEDICI , we simulate the mobility shift with the radiation-induced positive spatial charge. The nonuniform channel MOS 's mobility shift numerical results agree well with the analytical results. Uniform channel MOS 's mobility shift value agrees with that of the experiment.

Keywords : nonuniform channel MOS , image charge method , 2D-interaction potential

PACC : 6180 , 6185 , 7340Q