

半导体器件电离辐照损伤效应模拟的 数值算法及应用^{*1)}

马召灿 许竞劫 卢本卓²⁾

(LSEC, 中国科学院数学与系统科学研究院计算数学研究所, 国家数学与交叉科学中心, 北京 100190)

李鸿亮²⁾

(四川师范大学数学科学学院, 成都 610066)

摘要

本文研究了半导体器件伽马辐照电离损伤效应定量物理模型系列算法, 其中包括有限元空间离散、隐式时间积分以及非线性系统解耦迭代算法. 算法有效地处理了电离损伤模型多组分、电-输运-反应多物理耦合以及强刚性等难点. 基于三维并行有限元平台 (PHG), 我们完成了半导体器件电离辐照效应三维并行求解器 TIDSim 的研制. 针对典型场效应晶体管 NMOS、双极晶体管 GLPNP 进行了电离辐照损伤模拟, 数值模拟结果与器件辐照实验数据吻合.

关键词: 辐射效应; 电离损伤; 总剂量效应; 有限元; TIDSim

MR (2010) 主题分类: 62P35

NUMERICAL ALGORITHM AND APPLICATION IN SIMULATION OF RADIATION DAMAGE EFFECTS ON SEMICONDUCTOR DEVICES

Ma Zhaocan Xu Jingjie Lu Benzhuo

(LSEC, Institute of Computational Mathematics, Academy of Mathematics and Systems Science,
National Center for Mathematics and Interdisciplinary Sciences, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100190, China)

Li Hongliang

(Department of Mathematics, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China)

Abstract

In this paper, a series of algorithms for quantitative physical model of ionization damage effects on semiconductor devices are developed, including finite element method, implicit time integration and decoupling iterative algorithms for nonlinear systems. The algorithms are shown to be effective to deal with the model complexities, including multi-physical coupling, nonlinear reaction system and stiff matrix solving. Based on the three-dimensional parallel finite element platform (PHG), these methods have been implemented into our simulation solver, TIDSim, which is designed for simulating ionizing radiation effects on semiconductor

* 2020年4月1日收到.

¹⁾ 基金项目: 科学挑战专题 (TZ201603), 国家重点研发计划 (2016YFB0201304), NSFC (11771435).

²⁾ 通讯作者: 李鸿亮, Email: lihongliang@mtrc.ac.cn; 卢本卓, Email: bzlu@lsec.cc.ac.cn.

devices. Ionization radiation damage simulations of silicon devices were performed for typical field effect transistors NMOS, bipolar transistors GLPNP. The numerical simulation results are in well agreement with the experimental data of device irradiation.

Keywords: radiation effects; ionizing effects; total ionizing dose effect; finite element method; TIDSim

2010 Mathematics Subject Classification: 62P35

1. 引言

伽马辐照是造成星用电子系统性能退化甚至永久失效的关键环境因素^[1]. 半导体器件电离辐照损伤有两大基本效应: 总剂量效应 (Total Ionizing Dose Effect), 即器件损伤随照射总剂量增加而累积增加^[2], 以及低剂量率增强效应 (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity, ELDRS 效应)^[3], 即在固定总辐照剂量条件下, 双极器件损伤随着辐照剂量率降低而增加. ELDRS 效应使得难以单独依靠辐照实验评估集成电路可靠性. 器件电离损伤效应建模与模拟一直是学界重点关注的热点问题.

伽马辐照致半导体器件损伤机制有两种基本模式, 射线诱发器件氧化层带电体缺陷累积导致器件阈值电压偏移, 或者射线诱发非晶二氧化硅-硅材料界面缺陷累积导致器件表面复合作用增强以及器件增益退化. 但是器件氧化层带电体缺陷以及界面缺陷增长的动力学机制一直是学界的公开问题. 因此有大量的工作研究如何建立上述两类缺陷累积的定量动力学模型^[4]. 本文采用佛罗里达大学 Mark Law 团队基于第一性计算的定量损伤模型^[5,6]. 该模型是目前相对较为完善的定量模型, 其中涵盖了空间电场的散射、光生非平衡载流子复合以及质子释放与去钝化等多种机制. 另外, 模型中的参数可以通过第一性计算求得, 对材料测试依存度较低便于进行计算.

目前器件电离损伤效应数值模拟研究结果相对较少, 成果主要集中于典型器件结构 (金属-非晶二氧化硅-硅, MIS 结构) 电离损伤机制的一维或者二维验证模拟, 非常缺乏器件电离损伤与电学响应三维数值模拟方面的研究结果. 从科学工程计算角度来讲, 电离损伤模型是一个典型的多组分、多物理、强刚性非线性耦合模型, 其三维求解器研发难度远远高于通用半导体器件模拟求解器. 学界也非常缺乏有效的模拟软件, 商用半导体 TCAD 软件对器件辐照损伤模拟支持严重不足. 针对上述问题, 我们提出了一整套适用于电离损伤定量模型的数值算法, 其中包括有限元空间离散、长时间稳定的隐式时间积分格式以及强刚性非线性系统解耦迭代算法, 并基于三维并行自适应有限元平台 PHG 研制了器件电离损伤并行有限元求解器 TIDSim 及应用软件系统 3Ddevice^[7]. 我们选取了场效应晶体管 NMOSFET 和双极晶体管 GLPNP, 分别进行了器件电离损伤总剂量效应以及 ELDRS 效应模拟测试. 所有数值模拟结果很好地拟合了真实辐照实验数据.

2. 器件电离损伤定量模型

2.1. 电离损伤主要反应机制

在辐照条件下非晶二氧化硅氧化层被视为宽禁带半导体材料. 伽马射线会在整个器件内部诱导大量的非平衡载流子. 器件硅掺杂区域产生的非平衡载流子会迅速复合湮灭. 氧化层

以及非晶二氧化硅 - 硅界面含有大量的深、浅能级缺陷以及氢杂质, 能与非平衡载流子发生复杂的运输 - 反应过程. 因此电离损伤动力学过程主要发生在器件氧化层以及界面区域.

氧化层电离损伤主要动力学机制归结如下^[8],

1. 康普顿效应: 即伽马射线诱发氧化层区域产生电子 - 空穴对;
2. 悬挂键 (N_{it}) 质子生成机制: 即电子、空穴、氧化层体缺陷、氢分子 (H_2) 发生一系列复杂反应, 并释放质子的动力学过程;
3. 氧化层带电体缺陷 (N_{ot}) 生成机制: 氧化层深能级缺陷捕获空穴, 形成长时间稳定的带电体缺陷;
4. 去钝化效应: 质子在电场作用下定向运输至 SiO_2 -Si 界面, 与钝化后的 Si-H 键作用将其还原为悬挂键 (Si-), 即带电界面缺陷 (N_{it}) 的过程, 即 $H^+ + Si-H \longleftrightarrow N_{it} + H_2$.

上述 2、3、4 过程中参与反应的粒子以及缺陷共计 18 种, 其中可移动粒子为电子 (e^-)、空穴 (h^+)、氢分子 (H_2) 以及质子 (H^+), 界面缺陷为硅氢键 (Si-H) 与悬挂键 (N_{it}), 体缺陷分别为浅能级缺陷 ($V_{o\delta}, V_{o\delta}H, V_{o\delta}H_2$)、深能级缺陷 ($V_{o\gamma}, V_{o\gamma}H, V_{o\gamma}H_2$) 以及带电缺陷 ($V_{o\delta}^+, V_{o\delta}H^+, V_{o\delta}H_2^+, V_{o\gamma}^+, V_{o\gamma}H^+, V_{o\gamma}H_2^+$). 令 \mathcal{A} 为可动粒子以及体缺陷组成的指标集, 即 $\mathcal{A} = \{e^-, h^+, \dots, V_{o\delta}^+, \dots\}$.

粒子与缺陷反应方程主要分为两种类型,

$$\begin{cases} A_1 + B_1 \longleftrightarrow C_1, \\ A_2 + B_2 \longleftrightarrow C_2 + D_2. \end{cases} \quad (2.1)$$

为了记述方便, 我们引入“单位粒子” I_d , 并将 (2.1)₁ 重写为

$$A_1 + B_1 \longleftrightarrow C_1 + I_d,$$

其中 I_d 的浓度始终为 1, 并在反应中保持不变. 粒子与缺陷的反应方程总计 21 个, 参见表 1. 令 $\mathcal{A}^+ = \mathcal{A} \cup \{I_d\}$ 为增广指标集. 我们利用笛卡尔对来表示粒子与缺陷的反应关系, 即

$$\mathcal{R} = \{(\iota, \tau) \mid \text{存在 } \kappa, \zeta \in \mathcal{A}^+, \text{ 使得 } \iota + \tau \longleftrightarrow \kappa + \zeta\}.$$

由于反应物可以交换顺序, 所以 (ι, τ) 与 (τ, ι) 为集合 \mathcal{R} 相同的元素. 反应速率正比于参与反应粒子以及缺陷的浓度, 并且反应速率系数通过反应势垒计算, 具体计算公式参见 (引用文献). 令 \mathcal{R}_ι 为 ι (粒子/缺陷) 参与的反应, 即 $\mathcal{R}_\iota = \mathcal{R}_\iota^I \cup \mathcal{R}_\iota^{II}$, 其中 $\mathcal{R}_\iota^I = \{(\iota, \tau) \in \mathcal{R}\}$ 以及 $\mathcal{R}_\iota^{II} = \{(\kappa, \zeta) \mid \kappa + \zeta \longleftrightarrow \iota + \tau, (\iota, \tau), (\kappa, \zeta) \in \mathcal{R}\}$. 那么 i (粒子/缺陷) 净生成速率为

$$G_\iota = - \sum_{(\iota, \tau) \in \mathcal{R}_\iota^I} \alpha_{\iota, \tau} C_\iota C_\tau + \sum_{(\kappa, \zeta) \in \mathcal{R}_\iota^{II}} \alpha_{\kappa, \zeta} C_\kappa C_\zeta, \quad \iota \in \mathcal{A}, \quad (2.2)$$

其中 C_i 为 i (粒子/缺陷) 的浓度, $\alpha_{i,j}$ 为 i 与 j 发生反应的反应速率系数. 由于反应系数相差数个量级, 因此电离损伤模型是一个典型的强刚性模型.

表 1 化学反应方程及其相关能量和反应系数

反应方程式	E_f (eV)	E_r (eV)	正向反应速率系数	逆向反应速率系数
$V_{o\gamma} + h^+ \Leftrightarrow V_{o\gamma}^+$	0.0	4.5	$1.03e-13$	$1.26e-62$
$V_{o\gamma}^+ + H_2 \Leftrightarrow V_{o\gamma}H + H^+$	0.5	0.8	$1.92e-19$	$1.03e-19$
$V_{o\gamma}^+ + e^- \Leftrightarrow V_{o\gamma}$	0.4	9.0	$1.97e-14$	$3.21e-138$
$V_{o\delta} + h^+ \Leftrightarrow V_{o\delta}^+$	0.0	0.6	$1.03e-13$	$4.16e+3$
$V_{o\delta}^+ + H_2 \Leftrightarrow V_{o\delta}H + H^+$	1.4	0.8	$1.46e-34$	$1.03e-19$
$V_{o\delta}^+ + e^- \Leftrightarrow V_{o\delta}$	0.0	9.0	$2.06e-7$	$3.21e-138$
$V_{o\gamma}H + h^+ \Leftrightarrow V_{o\gamma}H^+$	0.0	4.5	$1.03e-13$	$1.26e-62$
$V_{o\gamma} + H^+ \Leftrightarrow V_{o\gamma}H^+$	1.8	2.0	$8.21e-37$	$5.04e-22$
$V_{o\gamma}H^+ + e^- \Leftrightarrow V_{o\gamma}H$	0.0	7.5	$2.06e-7$	$5.07e-113$
$V_{o\delta}H + h^+ \Leftrightarrow V_{o\delta}H^+$	0.0	0.6	$1.03e-13$	$4.16e+3$
$V_{o\delta} + H^+ \Leftrightarrow V_{o\delta}H^+$	0.6	0.4	$1.03e-19$	$3.81e+5$
$V_{o\delta}H^+ + e^- \Leftrightarrow V_{o\delta}H$	0.0	3.0	$2.06e-7$	$2.00e-37$
$V_{o\gamma}H_2 + h^+ \Leftrightarrow V_{o\gamma}H_2^+$	0.0	0.6	$1.03e-13$	$4.16e+3$
$V_{o\gamma}H + H^+ \Leftrightarrow V_{o\gamma}H_2^+$	0.8	0.4	$1.03e-19$	$3.81e+5$
$V_{o\gamma}^+ + H_2 \Leftrightarrow V_{o\gamma}H_2^+$	0.6	0.4	$4.02e-21$	$1.90e+5$
$V_{o\gamma}H_2^+ + e^- \Leftrightarrow V_{o\gamma}H_2$	0.0	9.0	$2.06e-7$	$3.21e-138$
$V_{o\delta}H_2 + h^+ \Leftrightarrow V_{o\delta}H_2^+$	0.0	0.6	$1.03e-13$	$4.16e+3$
$V_{o\delta}H + H^+ \Leftrightarrow V_{o\delta}H_2^+$	0.8	0.4	$1.03e-19$	$3.81e+5$
$V_{o\delta}^+ + H_2 \Leftrightarrow V_{o\delta}H_2^+$	1.2	0.5	$3.35e-31$	$3.98e+3$
$V_{o\delta}H_2^+ + e^- \Leftrightarrow V_{o\delta}H_2$	0.0	9.0	$2.06e-7$	$3.21e-138$

2.2. 控制方程

我们考虑 NMOS 单管器件, 其电离辐照损伤关键区域是栅极下方的氧化层, 参见图 1. 记 Ω 为器件氧化层区域, Γ_s 为非晶二氧化硅 - 硅界面. 电离损伤动力学过程可以由漂移扩散反应方程来描述, 其控制方程为

$$\begin{cases} \nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon}, & \text{in } \Omega, \\ \frac{\partial C_l}{\partial t} = -\nabla \cdot J_l + G_l + \chi_{\{e^-, h^+\}}(\iota)U_r, \iota \in \mathcal{A}, & \text{in } \Omega, \end{cases} \quad (2.3)$$

其中 $\rho = \sum_{\iota \in \mathcal{A}} q_\iota C_\iota$ 为电荷密度, $q_\iota = z_\iota q$ 为 ι (粒子/缺陷) 带电量, q 为单位电荷带电量, z_ι 为 (粒子/缺陷) 带单位电荷数, ϵ 为氧化层 α -SiO₂ 介电系数, G_ι 为 ι (粒子/缺陷) 净生成率, 参见 (2.2), $\chi_{\{e^-, h^+\}}$ 为特征函数

$$\chi_{\{e^-, h^+\}}(\iota) = \begin{cases} 1, & \iota \in \{e^-, h^+\}, \\ 0, & \iota \in \mathcal{A} \setminus \{e^-, h^+\}, \end{cases}$$

U_r 为电离辐照诱导电子 - 空穴对的生成函数 [2]

$$U_r = Y(E) \cdot G_0 \cdot R, \quad Y(E) = \left(\frac{E}{E + 0.55 \times 10^6} \right)^{0.7},$$

$G_0 = 7.6 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}/\text{rad}$ 为每 rad 辐照剂量诱导产生的电子 - 空穴对密度, R 为辐照剂量率. 本构方程为

$$\begin{cases} E = -\nabla\phi, \\ J_i = -D_i\nabla C_i + z_i\mu_i C_i E, \end{cases} \quad (2.4)$$

其中 ϕ 为静电势, D_i 和 μ_i 分别为扩散系数与迁移率, 并且满足 Einstein 关系 $D_i = \mu_i k_B T/q$, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度. 氧化层体缺陷与界面缺陷均为固定缺陷, 因此其扩散系数为零. 可移动粒子的扩散系数参见表 2.

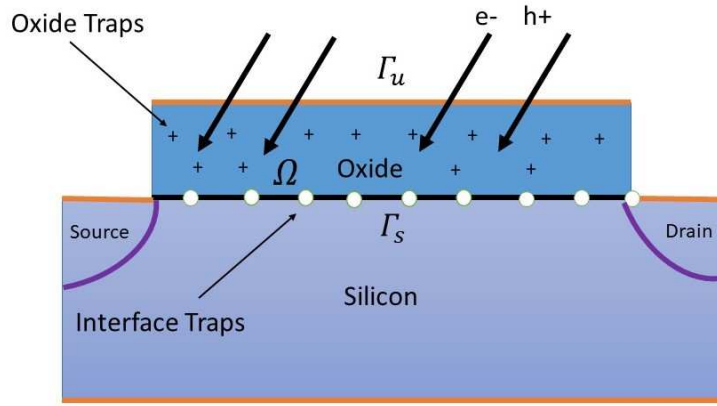


图 1 器件电离损伤关键区域示意图

表 2 $\alpha\text{-SiO}_2$ 内可移动粒子的扩散系数

粒子类型	e^-	h^+	H^+	H_2
扩散系数 D (cm^2/s)	5×10^{-3}	5×10^{-5}	1×10^{-10}	1×10^{-9}

由于氢钝化悬挂键需要数百度的高温环境, 所以我们不考虑去钝化反应的逆反应. 因此界面缺陷生成方程如下,

$$\frac{\partial C_{N_{it}}}{\partial t} = \alpha_{\text{SiH,H}^+} (C_{\text{Si-H}}^0 - C_{N_{it}}) (J_{\text{H}^+} \cdot n), \quad \text{on } \Gamma_s, \quad (2.5)$$

其中 $C_{\text{Si-H}}^0$ 为硅氢键 Si-H 的初始面密度.

注意到其非线性项 G_i 均为固定缺陷与漂移扩散项的耦合, 我们可以采用将漂移扩散项 (h^+ , e^- , H^+ , H_2) 给出一个均值, 对其线性化后在局部范围内考察该问题的刚性程度. 这里我们采用的均值范围为 $C_{h^+} = 10^8/\text{cm}^3$, $C_{e^-} = 10^5/\text{cm}^3$, $C_{\text{H}^+} = 10^8/\text{cm}^3$, $C_{\text{H}_2} = 10^{15}/\text{cm}^3$, 这里的取值均参考实验中所得到的值 [3, 4, 9].

考察这个一阶常系数方程组的初值问题:

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} &= AC + g, \\ C(0) &= C_{\text{bulk}}. \end{aligned}$$

因为浅能级缺陷和深能级缺陷并不直接相关, 所以形成了分块矩阵:

$$A = \begin{pmatrix} A1 & 0 \\ 0 & A2 \end{pmatrix}$$

$$A1 = \begin{pmatrix} -1.03 \times 10^{-5} & 2.00 \times 10^{-9} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.03 \times 10^{-5} & -2.00 \times 10^{-7} & 1.03 \times 10^{-11} & 0 & 0 & 1.90 \times 10^5 \\ 0 & 1.92 \times 10^{-7} & -1.00 \times 10^{-5} & 0.02 & 0 & 4.00 \times 10^5 \\ 8.00 \times 10^{-29} & 0 & 1.00 \times 10^{-5} & -0.02 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.00 \times 10^{-5} & 4.00 \times 10^3 \\ 0 & 4.00 \times 10^{-9} & 1.00 \times 10^{-11} & 0 & 1.00 \times 10^{-5} & -6.00 \times 10^5 \end{pmatrix}$$

$$A2 = \begin{pmatrix} -1.00 \times 10^{-5} & 4.00 \times 10^3 & 4.00 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 1.00 \times 10^{-5} & -4.00 \times 10^3 & 1.00 \times 10^{-11} & 0 & 0 & 4.00 \times 10^3 \\ 0 & 1.50 \times 10^{-22} & -1.00 \times 10^{-5} & 4.20 \times 10^3 & 0 & 4.00 \times 10^5 \\ 1.00 \times 10^{-11} & 0 & 1.00 \times 10^{-5} & -4.04 \times 10^5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.00 \times 10^{-5} & 4.00 \times 10^3 \\ 0 & 3.35 \times 10^{-19} & 1.00 \times 10^{-11} & 0 & 1.00 \times 10^{-5} & -4.00 \times 10^5 \end{pmatrix}$$

可以得到其对应的系数矩阵 A 的特征值, 其对应的最大特征值和最小特征值为:

$$\max_i \operatorname{Re}|\lambda_i| \approx 6.0 \times 10^5,$$

$$\min_i \operatorname{Re}|\lambda_i| \approx 2.5 \times 10^{-13},$$

注意到 $\operatorname{Re}\lambda_i < 0$, 且 $\max_i \operatorname{Re}|\lambda_i| \gg \min_i \operatorname{Re}|\lambda_i|$, 因此该问题为强刚性问题.

2.3. 初边值条件

模型对应的计算范围为图 1 的蓝色 Oxide 区域. 方程的边界条件, 其中 Γ_u 为与金属 Gate 交界面, Γ_s 为与 Si 交界面.

- 与金属 Gate 交界面 Γ_u , 电势在其上采用 Dirichlet 边界条件, 其中 ϕ_M 为金属的功函数, 取 4.1V [10], 粒子采用吸收边界条件 [11], 即:

$$\phi = V_g - \phi_M, \quad \text{on } \Gamma_u,$$

$$C_i = 0, \quad \text{on } \Gamma_u$$

- 与 Si 交界面 Γ_s , 电势在其上也采用第一类边界条件为接触势, 其中 ϕ_S 为半导体功函数, 取 4.4V [10], 即:

$$\phi = V_g - \phi_S, \quad \text{on } \Gamma_s$$

电子和空穴也是吸收边界条件:

$$C_{e^-, h^+} = 0, \quad \text{on } \Gamma_s$$

而质子则需要考虑界面态的生成动力学方程, 引入第三类边界条件, 其中 $k = 10^{-11} \text{cm}^2$ [8].

$$J_{H^+} \cdot \vec{n} = kC_{H^+}, \quad \text{on } \Gamma_s$$

- 未提及的其他边界 $\Gamma \setminus (\Gamma_s \cup \Gamma_u)$ 为与空气交界面, 其上粒子流法向分量以及电势法向导数均为零:

$$J(C_i) \cdot \vec{n} = 0, \quad \text{on } \Gamma \setminus (\Gamma_s \cup \Gamma_u).$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \vec{n}} = 0, \quad \text{on } \Gamma \setminus (\Gamma_s \cup \Gamma_u).$$

辐照前非晶 SiO_2 的起始缺陷浓度如表 3 所示. $V_{o\gamma}$ 、 $V_{o\delta}$ 、 H_2 以及氢化缺陷浓度严重依赖于器件的生产工艺, 我们仅给出典型条件下的平均值. 而对应的漂移扩散粒子, 如电子、空穴和质子, 它们的初始状态则设为 0 cm^{-3} .

表 3 非晶 SiO_2 内掺杂的粒子初始浓度

粒子/缺陷	H_2	$V_{o\gamma}$	$V_{o\delta}$	$V_{o\gamma}\text{H}$
浓度 / cm^3	$10^{11} - 10^{20}$	10^{15}	10^{18}	10^{14}
粒子/缺陷	$V_{o\delta}\text{H}$	$V_{o\gamma}\text{H}_2$	$V_{o\delta}\text{H}_2$	Si-H
浓度 / cm^3	10^{14}	$10^{14} - 10^{16}$	$10^{13} - 10^{16}$	$10^{13} / \text{cm}^2$

2.4. 器件电离损伤电学响应模型

我们在进行电离损伤电学响应测试时, 先仿真电离损伤模型得到其具体的物理量参数, 再将所得参数带入通用半导体中模拟得到响应的电学信号. 通用半导体仿真具体可参考本刊的另一篇文章^[12], 这里我们简要描述.

通用三维半导体器件的数值模拟包括描述硅型 (Si) 区域 (Ω_{Si}) 电场分布的 Poisson 方程:

$$-\nabla \cdot \epsilon \nabla \phi = q(p - n + \text{ND}^+ - \text{NA}^-), \quad \text{in } \Omega_{\text{Si}}$$

其中 p 为空穴浓度, n 为电子浓度, ND^+ 为施主杂质贡献一个电子后留在晶格上的带正电的离子浓度, NA^- 为受主杂质俘获电子后留在晶格上的带负电的离子浓度. 电子和空穴用连续性方程描述如下^[10]:

$$-\nabla \cdot J_n = R_n,$$

$$-\nabla \cdot J_p = R_p.$$

其中

$$J_n = -D_n \nabla n - \mu_n n (-\nabla \phi - \frac{k_B T}{q} \nabla \log(n_{ie})),$$

$$J_p = -D_p \nabla p + \mu_p p (-\nabla \phi + \frac{k_B T}{q} \nabla \log(n_{ie})).$$

其中 n_{ie} 为本征载流子浓度, D_n 、 D_p 分别表示电子空穴在 Si 介质中的扩散系数, μ_n 、 μ_p 分别表示电子空穴在 Si 介质中的迁移率. R_p 和 R_n 分别是空穴和电子的复合项.

电离损伤对于器件的损伤主要分为两类: 第一类是被俘获的正氧化物电荷 N_{ot} , 通过电场的改变来引起电流的变化^[13]; 第二类是通过界面缺陷引发的表面复合. 我们在得到电离损伤参数后在求解连续性方程时需要将其进行不同的处理.

针对辐射导致的二氧化硅带电缺陷 (N_{ot}) 对器件电场的影响, 需要 Poisson 方程在整体计算时, 在二氧化硅 (SiO_2) 区域 (Ω_{SiO_2}) 添加对应的带电缺陷的浓度, 即:

$$-\nabla \cdot \epsilon \nabla \phi = q \cdot [c_{V_{o\gamma}^+} + c_{V_{o\gamma}H^+} + c_{V_{o\gamma}H_2^+} + c_{V_{o\delta}^+} + c_{V_{o\delta}H^+} + c_{V_{o\delta}H_2^+}], \quad \text{in } \Omega_{\text{SiO}_2}$$

针对电离损伤导致的器件表面载流子的变化, 需要对二氧化硅表面加入因界面缺陷 (N_{it}) 引发的表面复合, 在其附近加入反应层, 并引入表面复合中心^[14]. 实验表明, 表面复合率 U_s 和表面处载流子浓度 c_s 成正比, 这里 c_s 可以是电子或空穴的浓度, 即:

$$U_s = rN_{it}c_s$$

其中 r 为对应粒子的俘获系数. 从上式可以看出, 辐射导致的 N_{it} 的增加, 使得表面复合速度增加, 同时引起相应复合基极电流增加. 我们在方程中考虑, 表面复合实际是半导体体内复合中心扩展到表面, 即表面流出的载流子以速度 rN_{it} 流出表面, 其流速单位为 cm/s :

$$-\int_V \nabla \cdot J dV = -\int_S J \cdot d\vec{S} = \int_S U_s dS = \int_S rN_{it}c_s dS$$

以电子为例 ($c_s = n$) 可以得到:

$$\begin{aligned} -J \cdot \vec{n} &= (D_{c_s} \nabla c_s + \mu_{c_s} c_s (-\nabla \phi)) \cdot \vec{n} \\ &= D_{c_s} \frac{\partial c_s}{\partial \vec{n}} - \mu_{c_s} c_s \frac{\partial \phi}{\partial \vec{n}} \\ &= U_s. \end{aligned} \quad (2.6)$$

又由于在 Si 和 SiO_2 界面处成立关于电势的边界条件:

$$\left[\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial \vec{n}} \right] = \sigma_{it}$$

这里的 σ_{it} 为表面电荷密度, $\sigma_{it} = qN_{it}$. 由 (2.6) 式我们可以得到针对表面浓度 c_s 的边界条件:

$$\begin{aligned} D \frac{\partial c_s}{\partial \vec{n}} &= \mu_{c_s} \frac{\partial \phi}{\partial \vec{n}} + rN_{it}c_s \\ &= c_s \cdot \left(\frac{\mu q}{\epsilon} + r \right) \cdot N_{it} \end{aligned}$$

3. 漂移扩散反应模型算法设计

半导体器件电离损伤漂移-扩散-反应方程具有多组分、强刚性、非线性耦合等特点. 由于模型十分庞杂, 数值自由度非常多, 不适合采用整体法来进行求解. 针对离散后的非线性系统, 我们基于经典 Gummel 迭代算法设计了稳健的解耦迭代算法.

3.1. 数值离散格式

令 \mathcal{T}_h 为区域 Ω 的三维网格剖分, 网格节点总数目为 N . 我们使用线性拉格朗日元对方程 (2.3) 与 (2.4) 进行空间离散. 引入无量纲电势 $U = \frac{q\phi}{k_B T}$, 令

$$U_h = \sum_{i=1}^N [U_h]_i \psi_i \quad \text{以及} \quad C_{l,h} = \sum_{i=1}^N [C_{l,h}]_i \psi_i,$$

其中 ψ_j 为网格节点 j 对应的线性拉格朗日元基函数. 将上式代入 (2.3), 由虚功原理可得,

$$\begin{cases} S_E U_h = \rho_h(C_{l,h}, l \in \mathcal{A}), \\ M \frac{\partial C_{l,h}}{\partial t} = S_D(U_h) C_{l,h} + G_{l,h}(C_{\tau,h}, C_{\kappa,h}; (\tau, \kappa) \in \mathcal{R}_l), l \in \mathcal{A}, \end{cases} \quad (3.1)$$

其中刚度矩阵为

$$[S_E]_{ij} = \int_{\Omega} \epsilon \nabla \psi_i \cdot \nabla \psi_j d\Omega, \quad M_{ij} = \int_{\Omega} \psi_i \psi_j d\Omega, \quad [S_D(U_h)]_{ij} = \int_{\Omega} \nabla \psi_i \cdot (-D_l \nabla \psi_j + \mu_l q_l \psi_j \nabla U_h) d\Omega,$$

以及数值源项为

$$[\rho_h]_i = \sum_{l \in \mathcal{A}} \int_{\Omega} q_l C_{l,h} \psi_i d\Omega = \sum_{l \in \mathcal{A}} q_l M C_{l,h},$$

$$[G_{l,h}]_i = - \sum_{(i,j) \in \mathcal{R}_i^+} \int_{\Omega} \alpha_{l,\tau} C_{l,h} C_{\tau,h} \psi_i d\Omega + \sum_{(\kappa,\zeta) \in \mathcal{R}_i^+} \int_{\Omega} \alpha_{\kappa,\zeta} C_{\kappa,h} C_{\zeta,h} \psi_i d\Omega.$$

电势以及粒子/缺陷浓度随时间推进而演化, 我们需要对 (3.1) 进行时间积分. 令 U_h^k 、 $C_{l,h}^k$ 分别为 t_k 时刻系统的电势与粒子/缺陷浓度. 由于反应速率系数相差数个量级, 半离散系统 (3.1) 是一个典型的强刚性问题. 显式格式需要根据反应速率的特征尺度来选择时间步长. 我们在 [11] 中对时间多步法进行了详细地讨论. 本文使用无条件稳定的隐式 Euler 格式, 全离散格式如下:

$$\begin{cases} S_E U_h^{k+1} = \rho_h(C_{l,h}^k, l \in \mathcal{A}), \\ M \frac{C_{l,h}^{k+1} - C_{l,h}^k}{\Delta t} = S_D(U_h^{k+1}) C_{l,h}^{k+1} + G_{l,h}(C_{\tau,h}^{k+1}, C_{\kappa,h}^{k+1}; (\tau, \kappa) \in \mathcal{R}_l), l \in \mathcal{A}, \end{cases} \quad (3.2)$$

其中 $\Delta t = t_{k+1} - t_k$.

界面缺陷 N_{rmit} 利用显式欧拉离散, 这里我们一般认为 C_{Si-H}^0 为常值:

$$\frac{C_{N_{it}}^{k+1} - C_{N_{it}}^k}{\Delta t} = \alpha_{SiH,H^+} (C_{Si-H}^0 - C_{N_{it}}^k) J_{H^+,h}^k \cdot \vec{n} \quad \text{on } \Gamma_s$$

其中 $J_{H^+,h}^k$ 为:

$$J_{H^+,h}^k = -D_{H^+} \nabla C_{H^+,h}^k + \mu_{H^+} q_{H^+} C_{H^+,h}^k \nabla U_h^k \quad (3.3)$$

3.2. 解耦迭代算法

考察非线性离散系统 (3.2), 该非线性离散系统含有:

$$S_D(U_h^{k+1}) C_{l,h}^{k+1} \quad \text{和} \quad G_{l,h}(C_{\tau,h}^{k+1}, C_{\kappa,h}^{k+1}; (\tau, \kappa) \in \mathcal{R}_l)$$

两种非线性项, 前者反映了电场和粒子浓度的耦合, 后者反映粒子间的反应产生的耦合. 针对前者, 在求解时采用解耦法计算每个新的时间层的 U_h^{k+1} 与 $C_{l,h}^{k+1}$ 并逐渐随时间步向前推进, 而在每一个时间步内, 我们做对应的 Gummel 迭代, 使得在该时间步内相关变量收敛, 类似于 Gauss-Seidel 的做法, 然后再做下一时间步. 针对后者采用线性化的方法:

$$G_{l,h}(C_{\tau,h}^{k+1}, C_{\kappa,h}^{k+1}; (\tau, \kappa) \in \mathcal{R}_l) = G_{l,h}(C_{\tau,h}^k, C_{\kappa,h}^k) + J_{G_{l,h}}(C_{\tau,h}^k, C_{\kappa,h}^k) C_{l,h}^{k+1} - J_{G_{l,h}}(C_{\tau,h}^k, C_{\kappa,h}^k) C_{l,h}^k \quad (3.4)$$

其中 $J_{G_{\iota,h}}(C_{\tau,h}^k, C_{\kappa,h}^k)$ 为对应非线性项 $G_{\iota,h}$ 的 Jacobi 矩阵, 上式既满足非线性展开的一阶精度又保持了其隐式的特质. 选取该种方法的另一个好处是它在每一个 Gummel 迭代步只需求解一些相对小规模线性代数方程 (3.5), 且组装简单, 只需要按顺序先求解可移动粒子, 再计算固定缺陷粒子.

$$M \frac{C_{\iota,h}^{k+1,n} - C_{\iota,h}^k}{\Delta t} = S_D(U_h^{k+1,n})C_{\iota,h}^{k+1,n} + G_{\iota,h}(C_{\tau,h}^{k+1,n}, C_{\kappa,h}^{k+1,n}; (\tau, \kappa) \in \mathcal{R}_{\iota}), \iota \in \mathcal{A} \quad (3.5)$$

我们给出适用于电离损伤模拟的非线性解耦迭代算法 1:

Algorithm 1 解耦迭代算法

0: 初始化剂量率 R , 并给出各离子的初始浓度, 对应时间层变量 k , 读入当前计算参数.

while $k * R < TotalDose$ **do**

 设内循环次数 $n = 0$

 利用式 (3.2)₁ 求解 $k + 1$ 时间层的电势:

$$S_E U_h^{k+1} = \rho_h(C_{\iota,h}^k, \iota \in \mathcal{A})$$

 以此 U_h^{k+1} 作为 $k + 1$ 层 Gummel 迭代电势的初值 $U_h^{k+1,0}$,

 同时给出粒子浓度的初值: $C_{\iota,h}^{k+1,0} = C_{\iota,h}^k$,

 开始内循环迭代:

while $\frac{\|U_h^{k+1,n} - U_h^{k+1,n-1}\|_{L_2}}{\|U_h^{k+1,n-1}\|_{L_2}} \leq tol$ **do**

 顺次求解漂移扩散方程和固定缺陷粒子常微分方程 (3.5).

 其中非线性项 $G_{\iota,h}(C_{\tau,h}^{k+1,n}, C_{\kappa,h}^{k+1,n}; (\tau, \kappa) \in \mathcal{R}_{\iota})$ 采用 (3.4) 进行处理.

 更新 $k + 1$ 时间层的电势, 计算当前内循环 n 层的式 (3.2)₁:

$$S_E U_h^{k+1,n} = \rho_h(C_{\iota,h}^{k+1,n}, \iota \in \mathcal{A})$$

 令: $n = n + 1$

end while

 根据 (3.3) 计算所在时刻的 $J_{H^+,h}^k \cdot \vec{n}$;

 再由界面方程 (3.3) 计算该时刻的界面缺陷浓度:

$$\frac{C_{N_{it}}^{k+1} - C_{N_{it}}^k}{\Delta t} = \alpha_{SiH,H^+} (C_{Si-H}^0 - C_{N_{it}}^k) J_{H^+,h}^k \cdot \vec{n} \quad \text{on } \Gamma_s$$

end while

4. 数值结果与讨论

由于电离损伤效应主要发生于氧化物区域, 双极器件和硅 MOS 器件作为主要的反应响应器件, 其输出特征曲线直接反应电离损伤的影响, 也是我们关注的焦点^{[15][13]}. 针对电离损伤效应, MOS 器件开启电压的漂移和双极器件基极电流的 ELDRS 效应是学界所关注的, 有大量的实验数据作为支撑, 所以我们的三维数值模拟主要展示针对以上两种现象进行考察. 针对器件的电学响应进行模拟, 目前学界一般是采用将电离损伤效应的参数直接带入 TCAD 软件给出仿真结果, 缺少完整的仿真流程和算法设计, 而实验又是极其复杂的, 受工艺等影响因

素较多, 难以反映真实的物理结果. 我们全流程仿真中先采用 TIDsim 求解电离损伤模型获得三维真实电离损伤参数再通过接口函数带入到半导体数值模拟解法器 DevSim^[12] 中求解, 从而获得针对这两种典型的器件结构受电离损伤效应的电学响应.

4.1. NMOSFET 电离损伤总剂量效应模拟

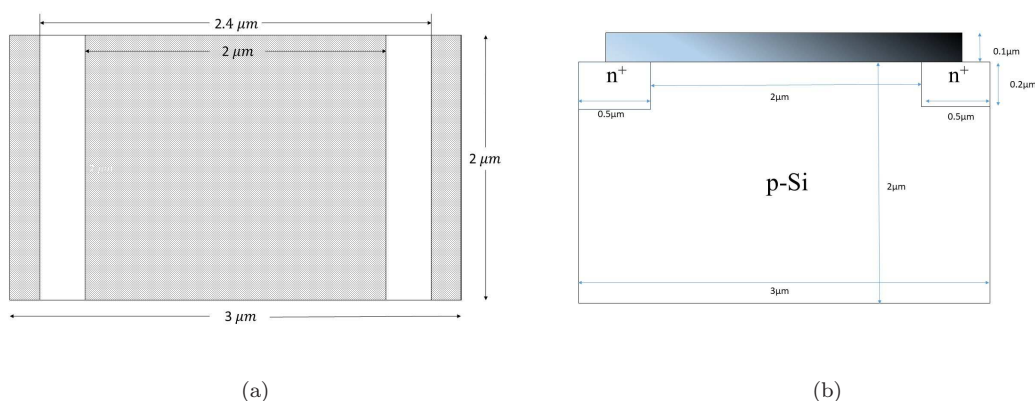


图 2 NMOSFET 结构: (a) 横切面版图; (b) 纵切面结构示意图

金属氧化物半导体 (NMOSFET) 暴露在高能电离辐射环境中, 其栅氧在辐照下内部区域电离出电子 - 空穴对, 并被氧化物陷阱俘获形成难以移动的正电荷, 最终导致其阈值电压向负方向平行漂移, 较大的阈值电压漂移可以使源漏泄露电流显著增加. 这是一种长期效应, 即在器件断电后该现象仍不会完全消除, 所以在学界也格外重视.

我们采用的 NMOSFET 结构网格包括单元数 78912, 自由度 15552, 我们采用的掺杂情况为均匀掺杂, 其中 Source 区域和 Drain 区域掺杂密度为 $10^{18}/\text{cm}^3$, Substrate 区域为 $10^{15}/\text{cm}^3$, 沟道长度为 $2 \mu\text{m}$, 氧化层厚度为 $t_{ox} = 0.1 \mu\text{m}$, 其结构和尺寸如图 4.1.

图 3 给出辐照前后 NMOSFET 器件沟道内的电子反型层的分布, 图中源漏电压 $V_D = 1.0 \text{ V}$, $V_S = 0 \text{ V}$, $V_{\text{Gate}} = 5 \text{ V}$, 扫描步长为 0.5 V ; 沟道内的电子的密度明显增大, 辐照引发栅压的改变, 进而导致阈值电压导致源漏泄露电流增大. 另一方面电离辐射效应产生的氧化物层中的俘获正电荷会在表面产生正电场, 影响 NMOSFET 器件表面特性, 在氧化物内场作用下电子部分进入了氧化物.

我们给出经过辐照后的 NMOSFET 输出特性曲线见图 4. 在这组实验中我们的辐射剂量定为 $10 \text{ Krad}(\text{SiO}_2)$ 、 $100 \text{ Krad}(\text{SiO}_2)$ 、 $200 \text{ Krad}(\text{SiO}_2)$ 、 $500 \text{ Krad}(\text{SiO}_2)$, 源漏电压 $V_D = 1.0 \text{ V}$, $V_S = 0 \text{ V}$, 如图 4 可见 NMOSFET 管的阈值电压向负方向平行漂移且漏 (Drain) 极电流增大, 且随着总剂量的提高, 阈值电压的漂移效果越明显, 这与文献^[16] 描述现象一致, 即表现出总剂量效应.

4.2. GLPNP 双极器件电离损伤 ELDRS 效应模拟

双极器件电离损伤导致的主要效应是基极电流因为辐射而增加, 即基极电流的增加量 ΔI_B , 最显著的性质是过剩基极电流的剂量率关系, 表现为对于低剂量率有较大的退化, 即

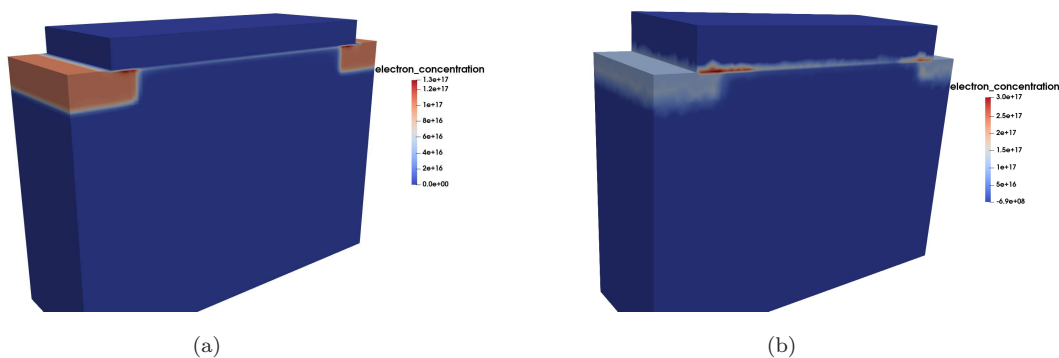


图3 辐照致 NMOSFET 反型层变化: (a) 辐照前; (b) 辐照 100Krad(SiO₂)

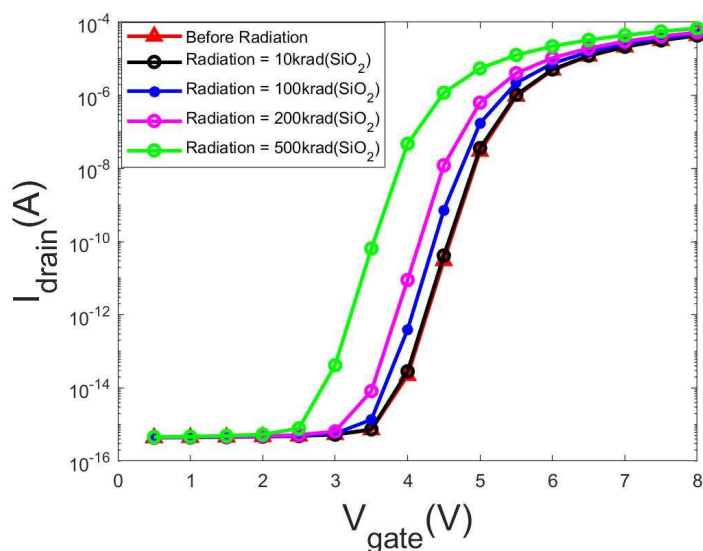


图4 辐射致 NMOSFET 开启电压漂移

低剂量增强效应. 低剂量率效应对于现代双极器件的空间应用极为重要, 实验一般在不实际及极其漫长的 (且费时费事) 低剂量率辐照下完成相关测试, 这也是我们进行相关数值模拟的初衷. 针对双极器件 GLPNP 设计的数值实验, 测试其基极电流的变化. 其对应的版图与纵向结构示意图见图 4.2. 我们采用的 GLPNP 结构包括共 74140 个单元和 14181 个自由度, 我们采用的掺杂情况为均匀掺杂, 其中 Emitter 掺杂 $10^{17}/\text{cm}^3$, Collector 掺杂 $10^{17}/\text{cm}^3$, Base 掺杂 $10^{15}/\text{cm}^3$.

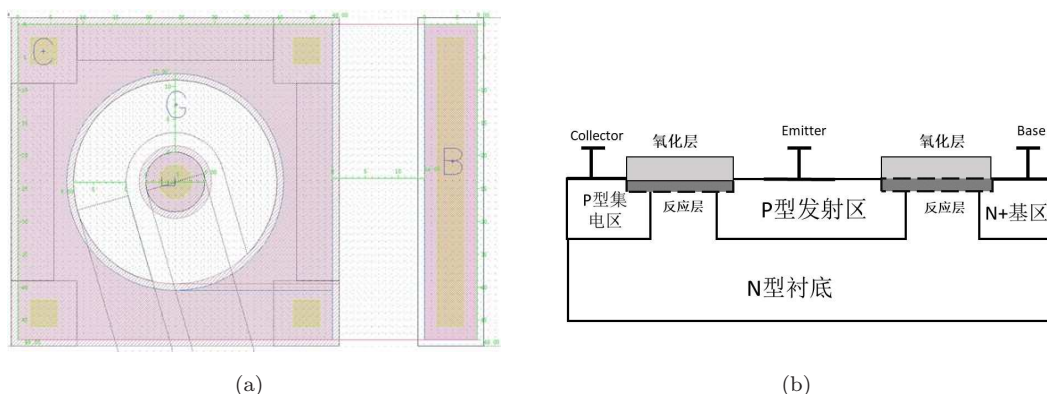


图 5 GLPNP 结构: (a) 横切面版图; (b) 纵切面结构示意图

因为 SiO_2 是我们的主要计算区域, 图 6 所示为环形二氧化硅中 N_{it} 分布随剂量率分布, 我们截取的环形 SiO_2 区域, 对应图 5(a) 中 G (Gate) 下层区域, 图 5(b) 中左侧氧化层区域. 由 N_{it} 分布. 我们模拟总剂量为 $30\text{Krad}(\text{SiO}_2)$ 情形, 根据参考文献 [3] 中的实验描述, 求解过程中采用剂量率为 $10^{-3} \text{ rad}(\text{SiO}_2)/\text{s} - 100 \text{ rad}(\text{SiO}_2)/\text{s}$, 图 6 中可以明显观察到界面缺陷在低剂量率条件下 ($0.01 \text{ rad}(\text{SiO}_2)/\text{s}$) 界面缺陷的产生要多于高剂量率 ($1 \text{ rad}(\text{SiO}_2)/\text{s}$) 条件下的生成量. 另外通过观察界面缺陷的分布情况, 因为质子更倾向由靠近中心 Emitter 的电势最弱处离开 SiO_2 区域, 同时生成大量带电界面缺陷, 可见其积累与质子的消耗相关.

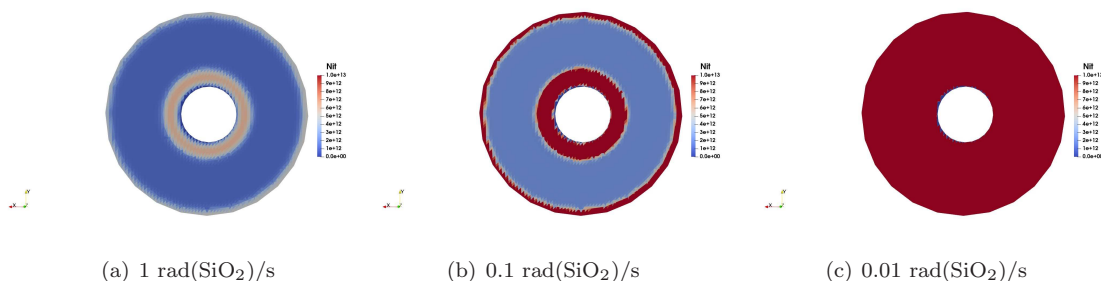


图 6 环形二氧化硅中 N_{it} 分布随剂量率分布

与 NMOSFET 相比, GLPNP 基极电流在电离损伤辐射中主要受界面缺陷的影响 [17], 使其在界面处的表面电势和载流子复合变得剧烈. 我们针对不同剂量率展开测试, 测试辐射强度设为 $30 \text{ Krad}(\text{SiO}_2)$, 采用的偏置状态 $V_B = 0.5 \text{ V}$, $V_C = V_E = 0\text{V}$, 扫描步长为 0.01V . 图 7(a) 为基极电流随 V_{EB} 的变化情况, 发现随着剂量率的增加基极电流增加. 考察其过剩基极电流 (ΔI_B) 随剂量率的变化, 定义过剩基极电流 $\Delta I_B = I_B - I_{B0}$ 这里 I_{B0} 是辐照前的基极电流, I_B 是辐照后的基极电流, 图 7(b) 中可见在小于 $0.1 \text{ rad}(\text{SiO}_2)/\text{s}$ 时过剩基极电流呈现饱和状态, 而高剂量率条件下过剩基极电流则没有显著变化与文献 [3] 所描述趋势相同. 继续考察电流增益系数 $\beta = I_C/I_B$, 一般在小电流下, 基极电流主要是空间电荷区复合电流和基区表面复合电流, 随正向电压的增加比正向注入电流慢, 导致 β 下降并趋于一个稳定的常值 [12]. 这里

为了方便我们判断其退化的程度,减小因为器件本身掺杂和升压产生干扰,我们参考 [18, 19] 做归一化处理,即辐射后电流增益系数要除以辐射前的在升压区段的增益系数的峰值 (β/β_{pk} , β_{pk} 是未受损伤的双极器件增益系数的峰值). 图 7(c) 为不同剂量率影响下,归一化增益系数不同剂量率条件下与 V_{BE} 关系,其峰值大概出现在 0.4-0.5 V 之间,图中可以明显观察到在高剂量率条件下,器件的损伤情况较小,而在低剂量率条件下损伤情况加大,且逐渐饱和. 图 7(d) 为固定发射结电压 (V_{BE}) 条件下归一化电流增益随剂量率的变化,可见归一化的电流增益系数在低剂量率条件下急剧减小,退化到原器件峰值的 0.3 左右;而在高剂量率条件下该型器件基本没有表现出退化.

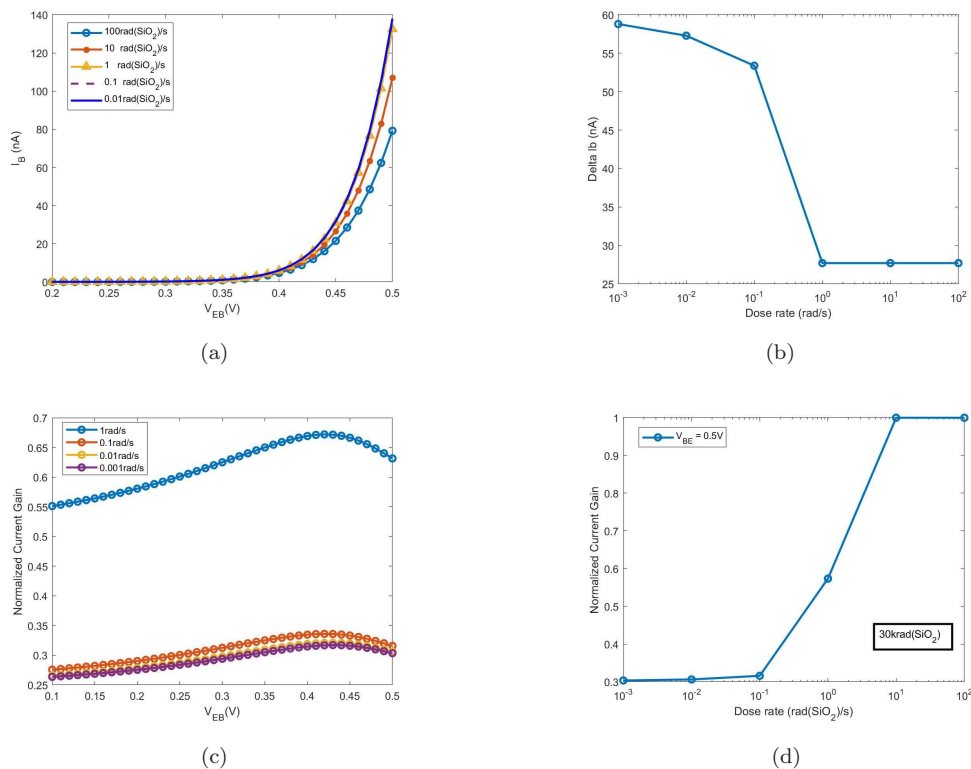


图 7 GLPNP 的 ELDRS 效应模拟结果:(a) 不同剂量率条件下基极电流与 V_{BE} 关系; (b) 过剩基极电流 ΔI_B 与剂量率的依赖关系; (c) 归一化增益系数不同剂量率条件下与 V_{BE} 关系; (d) 归一化增益系数与剂量率的依赖关系

我们尝试解释这种物理机制,如图 8(b) 和图 8(a) 所示,在二氧化硅层下界面,电子发生了非常明显的聚集效应,可能是由于界面缺陷导致表面势和复合速率的改变 [8, 20], 电离辐射效应产生的氧化物层中的俘获正电荷会在表面产生正电场,影响表面特性,导致 pn 结反型层向 n 区扩散,耗尽层向 p 区扩散,使得此刻的 n 型基极区域转变为了 n^+ 区域,有较多的电子通过这种效应在发射极被反向注入,使得基极电流增加,有效基极增长,晶体管的电流增益降低. 又因为横向晶体管电流主要沿表面运动,所以带电的界面缺陷对于该型器件影响较大,这也是电离损伤引起 GLPNP 退化敏感的原因. 同时又因为图 6 中,在低剂量率条件下界面缺

陷产生较多, 对器件的上述影响也较大, 因而表现出了低剂量率增强的效应.

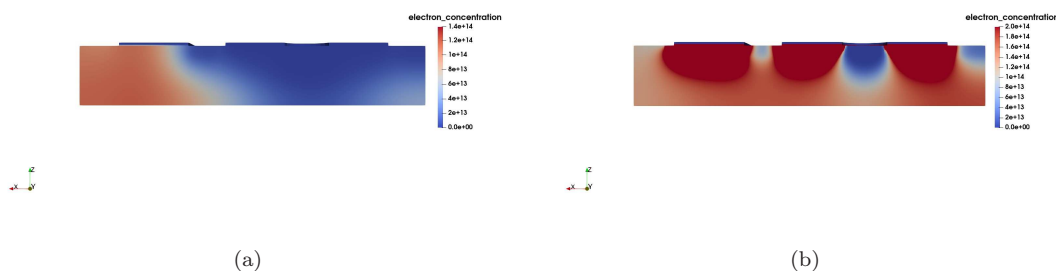


图 8 GLPNP 辐射前后电子分布 (a) 辐射前; (b) 辐射后 (0.001rad(SiO₂)/s)

5. 总 结

本文通过漂移扩散反应模型, 描述了由于电离损伤产生的陷阱电荷对于半导体器件的影响, 并给出其对应的数值方法. 算法上采用了有限元离散、隐式时间方法和线性化方法, 来处理模型中复杂网格结构、长时间演进和强非线性等问题. 针对不同的三维半导体器件, 如双极器件、场效应晶体管进行相对应的辐射损伤的仿真实验, 给出了在趋势和数量级上均与文献中实验结果相吻合的数值结果, 合理反映了电离损伤对于半导体电学输出特性的影响.

参 考 文 献

- [1] Claeys C, Simoen E. 先进半导体材料及器件的辐射效应 [M]. 国防工业出版社, 2008.
- [2] Oldham T R. Ionizing radiation effects in MOS oxides[M]. World Scientific, 2000.
- [3] Pease R L, Adell P C, Rax B G, Chen X J, Barnaby H J, Holbert K E, Hjalmarson H P. Th Effects of Hydrogen on the Enhanced Low Dose Rate Sensitivity (ELDRS) of Bipolar Linear Circuits [J]. IEEE T. Nucl. Sci., 2008, 55(6): 3169–3173.
- [4] Hjalmarson H P, Pease R L, Devine R A B. Calculations of Radiation Dose-Rate Sensitivity of Bipolar Transistors [J]. IEEE T. Nucl. Sci., 2008, 55(6): 3009–3015.
- [5] Blöchl P E. First-principles calculations of defects in oxygen-deficient silica exposed to hydrogen [J]. Phys. Rev. B, 2000, 62(10): 6158–6179.
- [6] Rowsey N L, Law M E, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Tuttle B R, Pantelides S T. A Quantitative Model for ELDRS and H₂ Degradation Effects in Irradiated Oxides Based on First Principles Calculations [J]. IEEE T. Nucl. Sci., 2011, 58(6): 2937–2944.
- [7] 黄成梓, 白石阳, 王芹, 马召灿, 张倩茹, 刘田田, 桂升, 卢本卓, 陈旻昕, 李鸿亮. 3Ddevice: 半导体器件辐射损伤效应仿真软件 [J]. 数值计算与计算机应用, 2020, 41(2): 121–142.
- [8] Esqueda I S. Modeling of total ionizing dose effects in advanced complementary metal-oxide-semiconductor technologies[M]. Arizona State University, 2011.

- [9] Chen X J, Barnaby H J, Vermeire B, Holbert K, Wright D, Pease R L, Dunham G, Platteter D G, Seiler J, McClure S, Adell P. Mechanisms of Enhanced Radiation-Induced Degradation Due to Excess Molecular Hydrogen in Bipolar Oxides [J]. *IEEE T. Nucl. Sci.*, 2007, 54(6): 1913–1919.
- [10] 刘恩科. 半导体物理学 [M]. 电子工业出版社, 2011.
- [11] Xu J, Ma Z, Li H, Song Y, Zhang L, Lu B. A Multi-Time-Step Finite Element Algorithm for 3-D Simulation of Coupled Drift-Diffusion Reaction Process in Total Ionizing Dose Effect [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2017, 31(1): 183–189.
- [12] 王芹, 马召灿, 白石阳, 张林波, 卢本卓, 李鸿亮. 三维半导体器件漂移扩散模型的并行有限元方法研究 [J]. *数值计算与计算机应用*, 2020, 41(2): 85–104.
- [13] 刘远, 恩云飞, 李斌, 师谦, 何玉娟. 先进工艺对 MOS 器件总剂量辐射效应的影响 [J]. *半导体技术*, 2006, 31(10): 738–742.
- [14] Claey s C, Simoen E. Radiation effects in advanced semiconductor materials and devices[M], volume 57. Springer Science & Business Media, 2013.
- [15] Enlow E W, Pease R L, Combs W, Schrimpf R D, Nowlin R N. Response of advanced bipolar processes to ionizing radiation [J]. *IEEE T. Nucl. Sci.*, 1991, 38(6): 1342–1351.
- [16] Jafari H, Feghhi S, Boorboor S. The effect of interface trapped charge on threshold voltage shift estimation for gamma irradiated MOS device [J]. *Radiation Measurements*, 2015, 73: 69–77.
- [17] Ball D R, Schrimpf R D, Barnaby H J. Separation of ionization and displacement damage using gate-controlled lateral PNP bipolar transistors [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002, 49(6): 3185–3190.
- [18] Schrimpf R, Graves R, Schmidt D, Fleetwood D, Pease R, Combs W, DeLaus M. Hardness-assurance issues for lateral PNP bipolar junction transistors [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1995, 42(6): 1641–1649.
- [19] Nowlin R N, Fleetwood D, Schrimpf R, Pease R, Combs W. Hardness-assurance and testing issues for bipolar/BiCMOS devices [J]. *IEEE transactions on nuclear science*, 1993, 40(6): 1686–1693.
- [20] 陆妩, 李小龙, 于新, 王信, 刘默寒, 姚帅, 常耀东. 双极器件 ELDRS 效应研究进展 [J]. *原子核物理评论*, 2019, 36(4): 477–483.