

不同栅压下 Si-n 型金属氧化物半导体场效应管 总剂量效应的瞬态特性仿真*

张林^{1)†} 马林东²⁾ 杜林²⁾ 李艳波¹⁾ 徐先峰¹⁾ 黄鑫蓉¹⁾

1) (长安大学能源与电气工程学院, 西安 710064)

2) (上海精密计量测试研究所, 上海 200031)

(2023 年 2 月 15 日收到; 2023 年 5 月 5 日收到修改稿)

为了实现半导体器件在电离辐射环境中电学特性的动态退化过程, 本文基于总剂量效应中陷阱对载流子的俘获/发射过程, 建立了 Si-n 型金属氧化物半导体场效应管总剂量效应的瞬态特性数值模型. 仿真了不同栅极偏压下, 器件电学特性随累积总剂量的上升而造成的器件退化效应, 并提取了 Si/SiO₂ 界面和栅氧化层中陷阱电荷的变化. 仿真发现, 随着累计总剂量的上升, 两个位置处陷阱电荷的数量都趋向于饱和. 当辐照中栅极偏压为正时, 器件阈值电压的退化幅度显著高于辐照偏压为负时的退化幅度. 无论是辐照过程中栅极加正偏压还是反偏压, 都表现出阈值电压的退化幅度随着偏压幅值上升先上升再下降的趋势. 栅极偏压对器件辐照后的退火效应也有一定的影响, 在退火过程中如果栅极偏压不为零, 器件退火后的电学特性恢复幅度比零偏压下的要低一些.

关键词: 辐照, 总剂量, 模型, 金属氧化物半导体场效应管

PACS: 85.30.Tv, 61.80.Ed, 73.40.Lq, 77.84.Bw

DOI: 10.7498/aps.72.20230207

1 引言

航天器中的半导体器件长期工作在空间辐射环境中, 由于宇宙射线和各种带电粒子的长期作用, 会使器件产生各种辐照效应, 导致器件的性能退化甚至失效^[1-3]. 随着航空航天技术的发展, 不仅对航天器中应用的半导体器件的电学性能的要求越来越高, 也对其可靠性和抗辐照特性提出了越来越高的要求.

在半导体器件的各种空间辐照效应中, 总剂量效应是最受关注的辐照效应之一^[4,5]. 特别是对于金属氧化物半导体 (metal-oxide semiconductor, MOS) 器件, 电离辐射会导致氧化层中和 SiO₂/Si 界面的

陷阱电荷增加, 从而导致如阈值电压漂移、关态泄漏电流增加、跨导减小等一系列的器件特性退化^[6-8].

为了提升半导体器件的辐照容限, 传统的方法是采用专用的抗辐射加固工艺, 这种方法成本高昂且研制周期长. 特别是随着半导体技术的迅猛进步, 专用的加固工艺线的技术水平远远落后于同时期的商用工艺线, 影响了新型半导体器件在航空航天等领域的应用. 因此, 采用通用的半导体工艺并结合计算机辅助设计技术 (TCAD), 在器件设计过程中考虑器件的辐照效应, 对器件参数进行优化设计, 获得电学性能优良的同时辐照容限高的半导体器件, 是比较理想的抗辐射器件设计方法^[9-11]. 但是, 总剂量效应的 TCAD 仿真目前还存在很多的问题. 其实最大的一个问题是, 在辐照过程中,

* 国家重点研发计划 (批准号: 2020YFC2200300)、上海市自然科学基金 (批准号: 20ZR1435700) 和陕西省重点研发计划 (批准号: 2021KW-13) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhanglin_dk@chd.edu.cn

陷阱荷电状态的变化是一个动态过程, 陷阱俘获载流子的概率与电场、辐照剂量率和温度等诸多因素有关^[12-14], 而目前通行的仿真方法难以实现半导体器件总剂量效应的瞬态特性仿真.

建立总剂量效应的瞬态仿真模型, 精确地反映器件结构、偏置条件、温度等因素对器件总剂量效应的影响, 对于分析半导体器件的辐照退化及高辐照容限器件的研制具有重要意义, 但相关研究目前尚较少见文献报道. 本文基于总剂量效应下半导体材料中陷阱俘获和发射载流子的物理机理, 建立了 Si-n 型金属氧化物半导体场效应管 (NMOSFET) 总剂量效应的瞬态特性的数值模型, 仿真了不同偏置电压等因素对器件辐照退化的影响.

2 总剂量效应和仿真模型

高能射线或带电粒子辐照半导体器件, 在 SiO₂ 中激发电子空穴对. 一部分电子空穴对短时间内复合, 未复合的电子空穴对会在电场的作用下漂移运动, 由于迁移率的差异, 电子被快速扫出氧化层, 而空穴在氧化层中缓慢输运. 在输运过程中, 一部分空穴被 SiO₂ 中的陷阱俘获, 形成稳定的氧化物陷阱正电荷; 一部分空穴输运到界面, 在那里参与反应生成界面陷阱^[15,16]. 通过上述的过程, 电离辐射效应共在器件中引入两种类型的缺陷: 氧化物陷阱电荷与界面陷阱电荷. 目前对于总剂量效应的模型和仿真研究, 也主要是研究这两种类型的缺陷对器件电学特性的影响.

目前报道较多的半导体器件总剂量效应的数值仿真方法, 主要是基于上述的总剂量效应在绝缘层中造成的损伤结果, 在氧化层中以及 Si/SiO₂ 界面处添加固定电荷或空穴陷阱^[17-20]. 虽然这样可以模拟出总剂量效应造成的器件电学特性退化, 但无法反映辐照感生电荷在辐照和退火过程中的动态变化, 也难以精确反映器件结构参数、电极偏置等因素对器件退化幅度的影响. 另外, 已有的研究表明, 电场会影响陷阱电荷的产生过程, 而陷阱电荷的变化又会影响器件内部的电场分布^[13,14]. 这个动态的变化过程只能通过瞬态仿真的方式实现, 但相关研究还较少见报道.

针对上述问题, 本文基于 Kimpton 和 Kerr^[21] 提出的辐照效应模型来描述陷阱俘获与发射辐照生载流子的过程. 该模型认为, 在辐照过程中陷阱

捕获载流子的过程与传统的陷阱理论相同, 但陷阱发射被俘获载流子的主要能量来源于辐照过程中电子空穴对的复合. 基于前面所述的总剂量效应的理论, 重点关注空穴陷阱在辐照过程中的动态特性.

根据上述假设, 已俘获空穴的陷阱发射空穴的概率为

$$E_P = G_0 \cdot \delta_{\text{rad}} (1 - Y) V_{\varnothing_D} \cdot P_{\text{trap}}, \quad (1)$$

式中, P_{trap} 为空穴陷阱密度; G_0 为辐照生电子空穴对的产生率; δ_{rad} 是辐照剂量率; V_{\varnothing_D} 是陷阱发射的相互作用体积; Y 是电子空穴对产生率, 它是一个与电场有关的函数:

$$Y = \left[\frac{|E| + (E_0 \cdot Y_0)}{|E| + E_0} \right]^{A_0}. \quad (2)$$

这里, Y_0 为零电场产生系数, E_0 为临界电场值, A_0 为产生率相关常数. 对于 SiO₂ 和 ⁶⁰Co 辐照源, G_0 , Y_0 , E_0 , A_0 分别取 $7.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}/\text{rad}$, 0, $5.5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 和 0.7^[18].

本模型假设陷阱的发射是受到辐照过程中的电子空穴对复合产生的声子的激发, 只有当电子空穴对复合发生在陷阱的相互作用体积之内才会发射俘获的载流子. 对于氧化层中的陷阱, 发射相互作用体积取值为发射截面对应的球形体积:

$$V_{\varnothing} = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \sigma_{\varnothing}^{3/2}. \quad (3)$$

对于氧化层界面的陷阱, 发射相互作用体积为发射截面和声子相互作用长度的乘积:

$$V_{\varnothing_D} = \sigma_{\varnothing} \cdot M_P, \quad (4)$$

其中, M_P 为声子相互作用长度, 在典型的 MOSFET 中, 声子相互作用长度取值为栅氧层的厚度.

发射截面 σ_{\varnothing} 是电场的函数:

$$\sigma_P = P_{\text{ST}} \cdot \left(\frac{|E|}{10^6} \right)^{P_E}, \quad (5)$$

$$\sigma_n = P_{\text{SN}} \cdot \left(\frac{|E|}{10^6} \right)^{P_E}, \quad (6)$$

其中 P_{SN} 和 P_{ST} 分别为电子和空穴的标准俘获截面, 分别取 1×10^{-30} 和 1.5×10^{-13} ; P_E 为俘获截面的电场相关系数, 取 -0.7. 可以看到, 俘获界面随电场的下降而上升, 但是存在最大值.

对于氧化层中的陷阱, 俘获界面的最大值为

$$\sigma_{\text{max}} = \left[\frac{3\sqrt{\pi}}{4} \left(\frac{P_P}{P_{\text{trap}}} \right) \right]^{2/3}. \quad (7)$$

对于氧化层界面的陷阱, 俘获界面的最大值为

$$\sigma_{\max} = P_p / P_{\text{trap}}. \quad (8)$$

其中 P_p 为电场为零时空穴的发射概率, 对于氧化层界面的陷阱和氧化层中的陷阱, 分别取 1.00 和 0.25.

基于上述理论, 空穴陷阱的瞬态电离概率为

$$f_t = \frac{\tau_n p - (P_{\text{trap}} \cdot \tau_n \tau_p) \frac{df_t}{dt}}{\tau_p n + \tau_n (p + \tau_p)}, \quad (9)$$

其中 τ_n 和 τ_p 分别为陷阱的电子和空穴寿命; n 和 p 分别为电子浓度和空穴浓度. 此离化率反映的是空穴被捕获和发射的概率之间的平衡.

寿命主要由俘获截面决定:

$$\tau_n = \frac{1}{P_{\text{trap}} \cdot \sigma_n v_n}, \quad (10)$$

$$\tau_p = \frac{1}{P_{\text{trap}} \cdot \sigma_p v_p}, \quad (11)$$

其中 σ_n , σ_p 分别是电子和空穴的俘获截面, 其定义与捕获截面一样 (见 (4) 式—(7) 式); v_n 和 v_p 分别是电子和空穴的俘获速率, 表示为

$$v_n = |J_n / (-qn)|, \quad (12)$$

$$v_p = |J_p / (-qp)|. \quad (13)$$

其中 q 为电子电量, J_n 和 J_p 分别为电子和空穴的电流密度.

3 仿真与结果分析

3.1 器件结构与辐照环境

基于第 2 节所述的模型, 采用 Silvaco TCAD 软件建立了 Si-NMOSFET 总剂量效应的数值模型. 器件结构如图 1 所示的平面结构 MOSFET, 栅长 $1 \mu\text{m}$, 衬底 p 型掺杂 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 栅极为多晶硅, 栅氧厚度 20 nm . 结合前文的分析, 仿真在栅氧中加入密度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的空穴陷阱, 栅氧和衬底界面处加密度为 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的空穴陷阱, 仿真陷阱在不同累计总剂量下荷电状态的变化以分析器件的总剂量效应损伤.

仿真中采用的辐照源为 ^{60}Co , 剂量率为 1 rad/s , 进行 10^6 s 的瞬态特性仿真, 对应累计总剂量 1 Mrad ($1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$); 然后停止辐照, 再持续 10^6 s 的瞬态特性仿真, 以仿真退火效应.

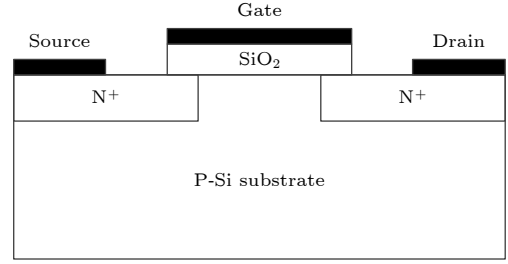


图 1 仿真中采用的 Si-NMOSFET 器件结构

Fig. 1. Diagram of Si-NMOSFET in simulation.

3.2 总剂量效应的瞬态特性仿真

基于上述的模型和参数, 仿真了器件在辐照和退火过程中的瞬态特性, 仿真过程中取 $V_{\text{GS}} = 0 \text{ V}$, 提取转移特性时取 $V_{\text{DS}} = 0.05 \text{ V}$, 以避免漏极电压对电场分布的影响. 辐照完成后, 在 $V_{\text{GS}} = 0 \text{ V}$ 下退火. 辐照和退火的温度都是 300 K . 辐照前后和退火后分别提取了器件的转移特性, 见图 2.

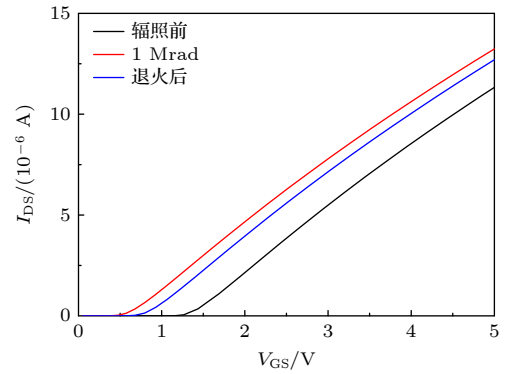


图 2 Si-NMOSFET 的转移特性

Fig. 2. Transfer characteristics of Si-NMOSFET.

从图 2 可以看到, 辐照后转移特性发生了显著的漂移, 阈值电压从 1.338 V 下降到 0.606 V ; 经过 10^6 s 的退火后, 器件特性有所恢复, 阈值电压恢复到了 0.802 V . 阈值电压的漂移源于陷阱电荷数量的上升影响了沟道区电势, 提取了栅氧化层厚度中间位置的陷阱电荷浓度和 Si/SiO₂ 界面陷阱电荷密度的变化, 如图 3 所示.

从图 3 可以看到, 辐照过程中, 两个位置的陷阱电荷数量的变化表现出来了类似的趋势, 都随辐照剂量的上升而上升, 经过退火后, 陷阱电荷都有一定程度的下降, 其中界面陷阱电荷密度从刚辐照完的 $1.635 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 下降到 $4.409 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, 而氧化层中间处的陷阱电荷浓度从刚辐照完的 $4.531 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 下降到 $3.542 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

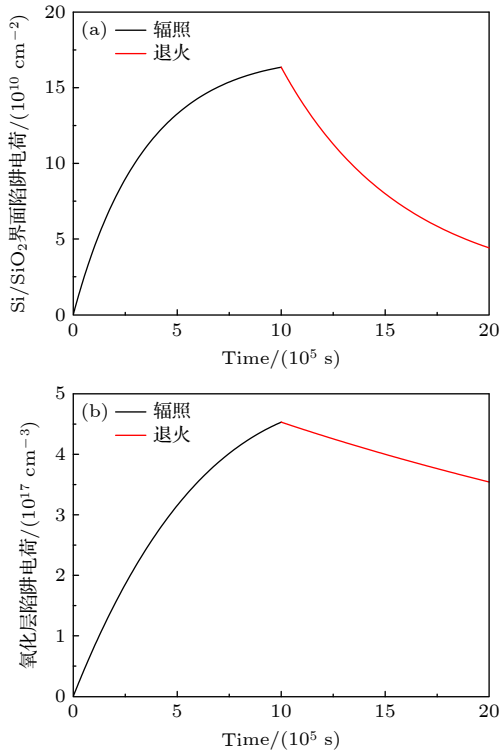


图3 (a) 界面陷阱电荷密度; (b) 氧化层陷阱电荷浓度
Fig. 3. (a) Trapped holes density in Si/SiO₂ interface; (b) trapped holes concentration in oxide layer.

从图3还可以看到,随着累计剂量的上升,两个位置的陷阱电荷数量的上升幅度都下降,呈现出饱和趋势.氧化层中陷阱电荷浓度如图4所示,靠近界面的陷阱电荷浓度较高,这是由于此时的电场方向让空穴向衬底方向漂移,让电子向栅电极方向漂移,这就导致靠近栅电极的空穴被复合的更多,而Si/SiO₂界面附近的陷阱俘获空穴的概率更高.

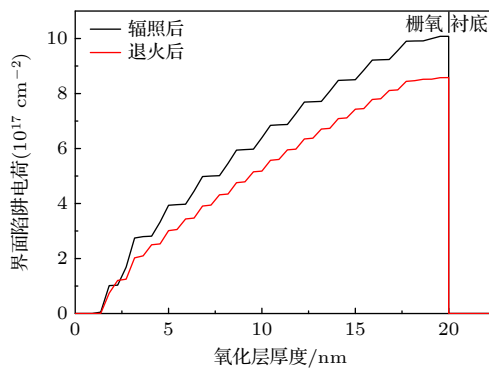


图4 氧化层中的陷阱电荷分布
Fig. 4. Distribution of trapped holes in oxide layer.

在源漏中间位置处,沿着纵向方向提取不同阶段下栅氧附近的电场分布如图5所示,陷阱俘获空穴后,荷电状态改变,让栅氧和衬底中的电场分布

重构,栅氧中原本均匀分布的电场变得不再均匀.对于此处零偏的情况,造成了栅氧界面附近的电场强度有明显上升.

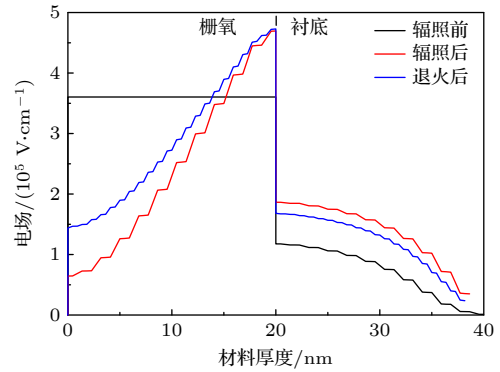


图5 栅氧附近的电场分布
Fig. 5. Distribution of electric field of gate oxide layer and nearby area.

3.3 不同偏压对总剂量效应影响

已有的研究表明,电极偏压是总剂量效应的重要影响因素,电场会影响辐照生电子空穴对的产生、运输和俘获/发射的整个过程^[12,14].仿真了辐照过程中栅极加不同偏压时器件的总剂量效应,转移特性的退化如图6所示,不同栅压下的器件辐照后转移曲线都向左漂移.无论是正偏还是反偏,都表现出随着偏压绝对值上升,阈值电压的退化幅度先上升再下降的趋势.

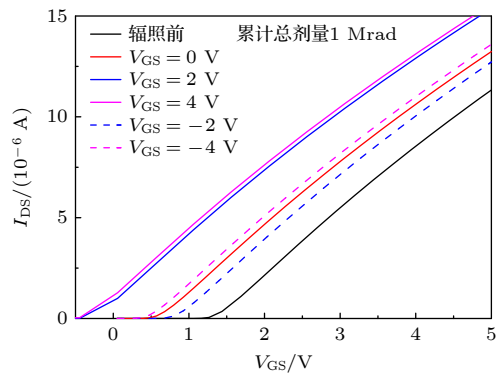


图6 不同辐照偏压下Si-NMOSFET的转移特性
Fig. 6. Transfer characteristics of Si-NMOSFET under the different radiation voltage biases.

不同辐照偏压下阈值电压的变化如图7所示,在本文的仿真中,无论栅偏压是正还是负,阈值电压退化幅度都随着栅压幅值的增大先上升再下降.其中当辐照偏压为4 V时,阈值电压的偏移高达1.704 V.

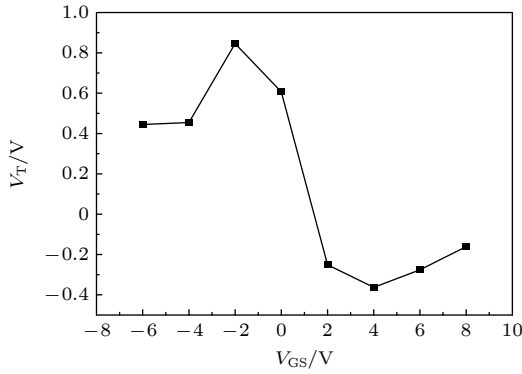


图 7 不同辐照偏压下 1 Mrad 辐照后器件的阈值电压

Fig. 7. Threshold voltage after 1 Mrad radiation under the different radiation voltage biases.

阈值电压偏移受栅电压影响的机理可以解释为 4 点.

1) 栅极零栅压时, 氧化层仅有来源于栅极和衬底之间功函数差的弱电场, 电子空穴对的初始复合率较大, 所以此时的阈值电压退化幅度比有栅压时要小.

2) 栅极正偏压时, 由于栅氧内强电场的存在, 电子空穴对初始复合率小, 空穴在电场驱动下向着 Si/SiO₂ 界面运动, 输运过程中部分空穴被氧化层陷阱俘获, 部分到达界面附近的空穴被界面陷阱俘获. 这导致在正偏压下产生的辐照生电荷是 3 种情况中最多的, 阈值电压的退化也最严重.

3) 栅极负偏压时, 虽然电子空穴对的初始复合率也比较小, 但由于此时电子向 Si/SiO₂ 界面方向漂移, 与 Si/SiO₂ 界面附近产生的辐照生空穴复合, 从而减少了界面附近的体陷阱和界面陷阱俘获空穴的概率. 空穴向栅极移动, 在栅极与 SiO₂ 的界面附近会有较多固定正电荷的形成, 但由于距离 Si/SiO₂ 界面较远, 对阈值电压的影响偏小.

4) 无论是栅极正偏还是反偏, 随着栅压幅值的增加, 氧化层中的电场增强, 电子空穴对的生成率上升而同时空穴的俘获截面下降. 这两个参数的变化让陷阱的俘获空穴的数量沿着相反的方向变化, 从而造成了阈值电压上述的复杂退化趋势.

不同辐照偏压下, 1 Mrad 辐照后, 界面陷阱电荷和氧化层陷阱电荷的变化如图 8 所示. 可以看到, 在辐照栅压正偏时, 无论是界面陷阱电荷还是氧化层陷阱电荷, 都是随着辐照偏压先上升再下降. 当栅压反偏时, 在电场作用下空穴会沿着远离 Si/SiO₂ 界面的方向漂移, 使得界面陷阱电荷的数

量相对正偏压时小得多, 氧化层中的陷阱电荷也主要出现在栅电极和栅氧的界面附近.

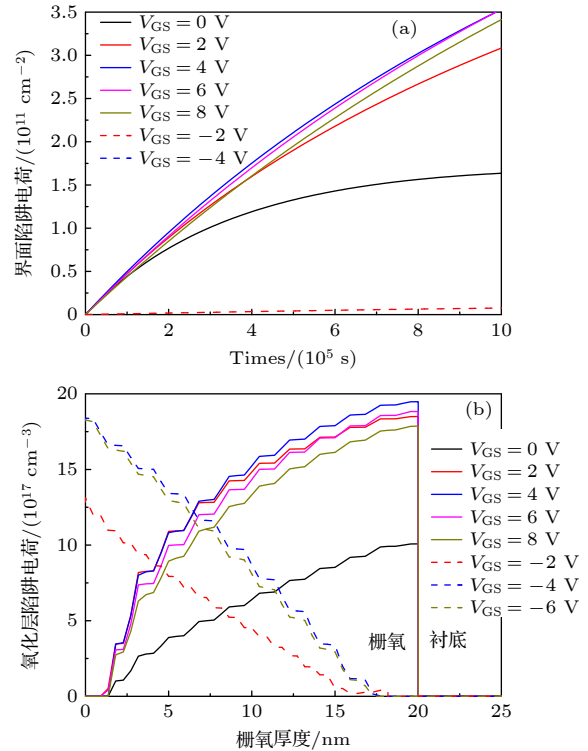


图 8 不同辐照偏压下陷阱电荷 (a) 界面陷阱电荷随累计总剂量变化; (b) 辐照后氧化层陷阱电荷的分布

Fig. 8. Trapped holes under different radiation biases: (a) Trapped interface holes with accumulated total dose; (b) distribution of trapped holes in oxide layer after irradiation.

3.4 总剂量效应的退火效应仿真

辐照停止后, 经过一段时间后, 陷阱会释放部分俘获的电荷, 使器件特性部分恢复, 即退火效应. 根据前文所述的模型, 在不同的电场强度下, 俘获空穴的陷阱发射空穴的概率是不同的, 图 9 是在不同栅极偏压下退火的仿真结果. 仿真时先让器件在栅偏压为 0 时, 以 1 rad/s 的剂量率辐照至 1 Mrad, 再以不同的栅偏压进行退火, 持续时间 10⁶ s, 退火温度为 300 K. 从图 9 可以看到, 在退火中施加了栅偏压后, 相比于零偏压下转移特性的恢复幅度有了显著的降低, 这主要是因为强电场下陷阱的俘获截面下降, 导致陷阱释放被俘获空穴的概率降低. 不同偏压下退火后界面陷阱电荷和氧化层陷阱电荷的变化如图 10 所示. 可以看到, 偏压主要是影响界面陷阱电荷, 对氧化层陷阱电荷的影响轻微的多, 而影响阈值电压的主要是氧化层陷阱电荷.

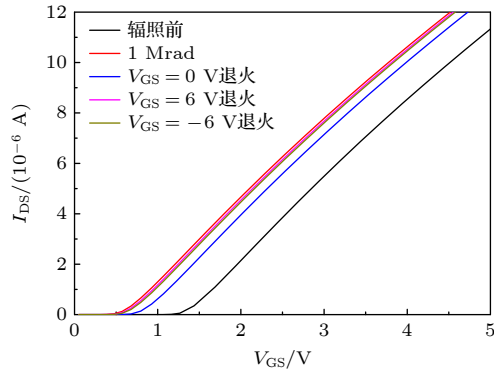


图9 Si-NMOSFET 辐照后不同偏压下的退火效应

Fig. 9. Annealing effect of Si-NMOSFET under different bias voltages after radiation.

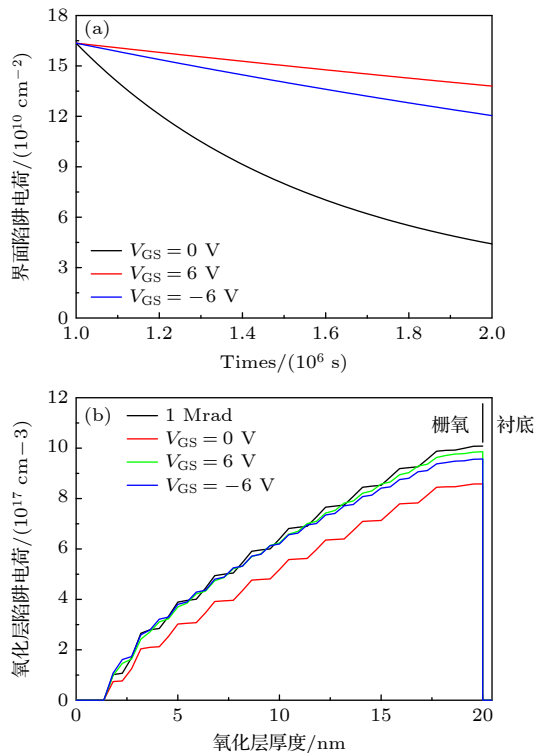


图10 不同偏压下退火后的陷阱电荷 (a) 界面陷阱电荷密度; (b) 氧化层陷阱电荷浓度

Fig. 10. Trapped holes after annealing under the different bias voltages: (a) Trapped interface holes density; (b) trapped holes concentration in oxide layer.

4 总结

实现半导体器件总剂量效应的瞬态仿真, 定量反映不同辐照环境、偏压和器件结构对器件辐照效应的影响对于高辐照容限的半导体器件的优化设计具有重要意义, 但是这方面的研究之前还有很多空白. 本文建立了 Si-NMOSFET 的总剂量效应的

数值模型, 重点仿真了不同栅偏压下器件的辐照退化和退火效应, 仿真结果比较准确地吻合了现有的半导体器件电离辐照理论.

采用本文的仿真方法, 可以基于陷阱在辐照和退火过程中的充放电过程, 准确评估电离辐照对器件特性的影响, 可以获得不同结构参数下器件的总剂量效应, 从而为宇航级器件的研制提供可信参考. 同时, 在不考虑仿真复杂度的情况下, 本文的模型可以应用器件其他任意电学特性的仿真中.

参考文献

- [1] Barth J L, Dyer C S, Stassinopoulos E G 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 466
- [2] Oldham T R, Mclean B 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 483
- [3] Barnaby H J 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3103
- [4] Jiang J Z, Shu W, Chong K S, Lin T, Zwa Lwin N K, Chang J S, Liu J Y 2016 *IEEE International Symposium on Circuits and Systems Montreal Montreal, Canada, May 22–25, 2016* p5
- [5] Xie X D, Yang Z Z, Deng M X, Chen K B, Li W 2019 *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* **19** 242
- [6] Dodd P E, Shaneyfelt M R, Schwank J R, Felix J A 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 1747
- [7] Hughes H L, Benedetto J M 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 500
- [8] Liu Z L, Hu Z Y, Zhang Z X, Shao H, Ning B X, Bi D W, Chen M, Zou S C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 116103 (in Chinese) [刘张李, 胡志远, 张正选, 邵华, 宁冰旭, 毕大炜, 陈明, 邹世昌 2011 物理学报 **60** 116103]
- [9] Liu Z L, Hu Z Y, Zhang Z X, Shao H, Ning B X, Chen M, Bi D W, Zou S C 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 1324
- [10] Johnston A H, Swimm R H, Allen G R, Miyahira T F 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 1941
- [11] McLain M, Barnaby H J, Holbert K E, et al. 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2210
- [12] Zhou X, L P, Ling R X, Wu Y C, Jiang P K 2019 *Microelectron.* **49** 842 (in Chinese) [周泉, 罗萍, 凌荣勋, 吴昱操, 蒋鹏凯 2019 微电子学 **49** 842]
- [13] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Fleetwood D M, et al. 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 1833
- [14] Gu Z Q, Guo H X, Pan X Y, Lei Z F, Zhang F Q, Zhang H, Ju A A, Liu Y T 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 166101 (in Chinese) [顾朝桥, 郭红霞, 潘霄宇, 雷志峰, 张凤祁, 张鸿, 琚安安, 柳奕天 2021 物理学报 **70** 166101]
- [15] Banerje G, Niu G, Cressler J D, Clark S D, Palmer M J, Ahlgren D C 1999 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46** 1620
- [16] Hjalmarson H P, Pease R L, Witeczak S C, et al. 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1901
- [17] Boch J, Saigne F, Touboul A D, et al. 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 232113
- [18] Peng C, Lei Z F, Zhang Z G, He Y J, Huang Y, En Y F 2019 *Acta Electron. Sin.* **47** 1755 (in Chinese) [彭超, 雷志峰, 张战刚, 何玉娟, 黄云, 恩云飞 2019 电子学报 **47** 1755]
- [19] Zhang J X, Wang X, Guo H X, Feng J, Lü L, Li P, Yan Y Y, Wu X X, Wang H 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 058502 (in Chinese) [张晋新, 王信, 郭红霞, 冯娟, 吕玲, 李培, 闫允一, 吴宪祥, 王辉 2022 物理学报 **71** 058502]
- [20] Zhang S H, Yuan Z Y A, Qiao M, Zhang B 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 107301 (in Chinese) [张书豪, 袁章亦安, 乔明, 张波 2022 物理学报 **71** 107301]
- [21] Kimpton D, Kerr J 1994 *Solid State Electron.* **37** 153

Transient characteristics simulation of total ionizing dose effect on Si n-metal-oxide-semiconductor field effect transistor under different gate voltage^{*}

Zhang Lin^{1)†} Ma Lin-Dong²⁾ Du Lin²⁾ Li Yan-Bo¹⁾

Xu Xian-Feng¹⁾ Huang Xin-Rong¹⁾

1) (*School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China*)

2) (*Shanghai Institute of Precision Measurement and Test, Shanghai 200031, China*)

(Received 15 February 2023; revised manuscript received 5 May 2023)

Abstract

In this work, we establish a novel numerical model of total ionizing dose effect and use it to simulate the radiation degradation of Si n-metal-oxide-semiconductor field effect transistor (NMOSFET) under different bias voltages. The model is based on the capture/emission process of traps, and is used to simulate the transient characteristics of semiconductor devices under total ionizing dose effect. In the simulation, the changes of trapped holes in Si/SiO₂ interface and gate oxide layer are extracted, and it is found that the number of trapped holes at different positions tends to be saturated with the increase of the total dose. When the radiation bias voltage is positive, the degradation amplitude of the threshold voltage is significantly higher than that when the radiation bias voltage is negative. Whether the gate is applied with positive bias or negative bias during the radiation, the degradation amplitude of the threshold voltage shows a trend of first increasing and then decreasing with the increase of the absolute value of radiation bias voltage. Radiation bias voltage also has a certain effect on the annealing effect after radiation. If a gate bias voltage is applied to the device during the annealing, the electrical characteristics recovery amplitude of the device is lower than that under zero bias voltage.

Keywords: radiation, total ionizing dose, model, metal-oxide-semiconductor field effect transistor

PACS: 85.30.Tv, 61.80.Ed, 73.40.Lq, 77.84.Bw

DOI: 10.7498/aps.72.20230207

^{*} Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2020YFC2200300), the Natural Science Foundation of Shanghai, China (Grant No. 20ZR1435700), and the Key Research and Development Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2021KW-13).

[†] Corresponding author. E-mail: zhanglin_dk@chd.edu.cn

不同栅压下Si-n型金属氧化物半导体场效应管总剂量效应的瞬态特性仿真

张林 马林东 杜林 李艳波 徐先峰 黄鑫蓉

Transient characteristics simulation of total ionizing dose effect on Si n-metal-oxide-semiconductor field effect transistor under different gate voltage

Zhang Lin Ma Lin-Dong Du Lin Li Yan-Bo Xu Xian-Feng Huang Xin-Rong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 138501 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230207

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一个圆柱形双栅场效应晶体管的物理模型

A physical model of cylindrical surrounding double-gate metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2021, 70(15): 157302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202156>

65 nm互补金属氧化物半导体场效应和晶体管总剂量效应及损伤机制

Radiation effect and degradation mechanism in 65 nm CMOS transistor

物理学报. 2018, 67(14): 146103 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172542>

绝缘体上硅金属氧化物半导体场效应晶体管中辐射导致的寄生效应研究

Radiation induced parasitic effect in silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2018, 67(21): 216102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181372>

不同应力下碳化硅场效应晶体管器件总剂量效应及退火特性

Total dose effect and annealing characteristics of silicon carbide field effect transistor devices under different stresses

物理学报. 2021, 70(16): 166101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210515>

短沟道金属-氧化物半导体场效应晶体管的散粒噪声模型

Shot noise model of the short channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2020, 69(17): 177102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200497>

纳米尺度金属-氧化物半导体场效应晶体管沟道热噪声模型

A channel thermal noise model of nanoscaled metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2020, 69(5): 057101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191512>