

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОНИКАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА БИПОЛЯРНЫЕ И МДП-ТРАНЗИСТОРЫ

С.А. Мискевич¹⁾, В.Н. Ювченко¹⁾, А.Ф. Комаров¹⁾, Г.М. Заяц²⁾, В.А. Божаткин³⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, Институт прикладных физических проблем имени Севченко, ул. Курчатова 7, 220045 Минск, Беларусь, komarAF@bsu.by

²⁾Институт математики НАН Беларуси, ул. Сурганова 11, Минск, Беларусь

³⁾НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл», ул. Казинца 121А, Минск, Беларусь

В работе моделируются радиационно-индуцированные изменения рабочих характеристик МДП и биполярных полупроводниковых структур на кремнии, происходящие при воздействии на них корпускулярного и электромагнитного излучения. Приведены зависимости изменения порогового напряжения МДП-структур, а также коэффициента усиления биполярных транзисторов от дозы облучения. Отдельно приведены результаты расчёта максимальных радиусов расплавленных областей в SiO₂ при облучении ионами различных масс и энергий.

Введение

Широкое использование кремниевых полупроводниковых интегральных структур в приборах военного и двойного назначения, а также в космическом пространстве и на объектах атомной энергетики подразумевает их повышенную стойкость к воздействию проникающих излучений, как корпускулярного, так и волнового типа. Для прогнозирования радиационной стойкости таких структур предпочтительнее применение математического моделирования, поскольку оно позволяет сократить временные и материальные затраты, необходимые для проведения серии долгосрочных натурных испытаний. Нами были разработаны физико-математические модели для моделирования радиационных изменений в МДП и биполярных транзисторах.

Радиационные эффекты в твердых телах

При облучении твердых тел высокоэнергетическими частицами или квантами в них происходят эффекты, условно разделяемые на три типа.

Радиационные эффекты первого типа связаны с дефектообразованием в кристаллической решётке, которое приводит к появлению дополнительных энергетических уровней в запрещённой зоне полупроводника, сокращению времени жизни неосновных носителей и, как следствие, деградации электрических характеристик приборов. К эффектам первого типа чувствительны биполярные транзисторы.

Эффекты второго типа связаны с ионизацией атомов кристаллической решётки и генерацией носителей заряда под воздействием потока высокоэнергетических фотонов. Накопление таких носителей на ловушках приводит к появлению встроенных зарядов, к которым очень чувствительны МДП-структуры.

Эффекты третьего типа вызываются единичными высокоэнергетическими тяжёлыми частицами, прохождение которых через прибор приводит к появлению каналов утечки, замыканию областей и ошибкам в работе устройств.

Таким образом, в данной работе рассмотрены радиационные эффекты данных трёх типов.

Радиационная деградация МДП-структур

Для МДП-структур механизм радиационной деградации может быть описан моделью

пространственно-временной эволюции заряда в процессе облучения, основанной на следующей системе уравнений [1, 2]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n \frac{\partial (n \cdot E)}{\partial x} - R_{n1}(n, E, P_{t1}) - R_{n2}(n, E, P_{t2}) + G(E), \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \mu_p \frac{\partial (p \cdot E)}{\partial x} - R_{p1}(p, E, P_{t1}) - R_{p2}(p, E, P_{t2}) + G(E), \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_{t1}}{\partial t} = R_{p1}(p, E, P_{t1}) - R_{n1}(n, E, P_{t1}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_{t2}}{\partial t} = R_{p2}(p, E, P_{t2}) - R_{n2}(n, E, P_{t2}),$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{q}{\epsilon_{ox} \epsilon_0} (P_{t1} + P_{t2} + p - n). \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_t}{\partial t} = -\alpha_1 \exp(-\alpha_2 x) P_t. \quad (5)$$

$$V_G = \phi_{ms} + \psi_s - \left(\frac{Q_{ot}}{C_{ox}} + \frac{Q_{sc}(\psi_s)}{C_{ox}} + \frac{Q_{ss}(\psi_s)}{C_{ox}} \right). \quad (6)$$

где d – толщина диэлектрика, E – напряжённость электрического поля, t_f – время моделирования, μ_n и μ_p – подвижность носителей заряда в диэлектрике, σ_n и σ_p – сечения захвата носителей заряда на ловушках, D_n и D_p – коэффициенты диффузии электронов и дырок, G – скорость генерации пар носителей в диэлектрике при облучении, n и p – концентрации электронов и дырок в диэлектрике, $N_{t1,2}$ и $P_{t1,2}$ – концентрации мелких и глубоких ловушек и захваченного дырочного заряда, $R_{n1,2}$, $R_{p1,2}$ – скорости захвата электронов и дырок на ловушках, v_{th} – тепловая скорость носителей, q – заряд электрона, ϵ_{ox} – диэлектрическая проницаемость диэлектрика, ϵ_0 – электрическая постоянная, V_G – напряжение на затворе, ϕ_{ms} – разность работ выхода материала затвора и полупроводника; ψ_s – поверхностный потенциал полупроводника; Q_{ot} – эффективный заряд в диэлектрике; Q_{sc} – заряд области пространственного заряда; Q_{ss} – заряд на поверхностных состояниях; C_{ox} – ёмкость слоя диэлектрика, α_1 и α_2 – частотный и барьерный факторы.

Численное решение системы (1 – 6) реализовано в работе [3], где сначала находим распределение зарядов по рабочей области, величины зарядов в окисле Q_{ot} , в области пространственного заряда полупроводника Q_{sc} и на поверхностных состояниях Q_{ss} , а затем вычисляем пороговое напряжение по (6) при условии, что $\Psi_s = 2\phi_0$.

Результаты моделирования радиационных изменений порогового напряжения МДП-структуры приведены на рис. 1. Облучение производилось рентгеновскими квантами с энергией 20 кэВ, напряжение на затворе поддерживалось на уровне -0.9 В.

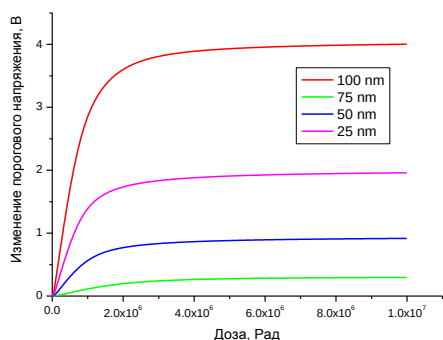


Рис. 1. Зависимость изменения порогового напряжения от дозы облучения

Как видно из рисунка, в рассматриваемом диапазоне доз облучения изменение порогового напряжения достигает 2 и более вольт, что в несколько раз превышает таковое до облучения и может привести к выходу за пределы норм ТУ.

Радиационная деградация биполярных транзисторов

Механизм воздействия ионизирующего излучения на биполярные транзисторы состоит в создании центров захвата, рассеяния и рекомбинации носителей заряда и, как следствие, сокращении времени жизни неосновных носителей заряда в рабочих областях [4].

Модель пространственно-временной эволюции дырок в рабочих областях биполярного p - n - p транзистора включает уравнение непрерывности для неравновесных дырок:

$$\frac{\partial p(x)}{\partial t} = -\frac{p(x) - p_n(x)}{\tau_p(x)} + D_p \frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2} - \mu_p E(x) \frac{\partial p(x)}{\partial x} - p(x) \mu_p \frac{\partial E(x)}{\partial x} \quad (7)$$

с граничными условиями

$$p(0) = \frac{n_i^2}{N(0)} \cdot e^{\frac{qU_B}{kT}}, p(W_A) = 0, \quad (8)$$

выражение для напряжённости встроенного электрического поля

$$E(x) = -\frac{kT}{q} \frac{1}{N(x)} \frac{dN(x)}{dx}, \quad (9)$$

выражение для модуляции ширины коллекторного перехода

$$W_C = W_{C0} \sqrt{1 - \frac{U_C}{U_{dc}}}, \quad (10)$$

зависимость времени жизни неравновесных носителей от дозы облучения

$$\frac{1}{\tau_\Phi} = \frac{1}{\tau_0} + k_\tau \Phi, \quad (11)$$

выражения для определения плотности токов через переходы [5]

$$j_{pe} = \frac{dp(0)}{dx} q D_p, \quad j_{pk} = \frac{dp(W_A)}{dx} q D_p, \quad (12)$$

где $\tau_p(x)$ – время жизни, μ_p – подвижность, k –

постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, U_B – напряжение на переходе эмиттер-база, n_i – собственная концентрация носителей заряда в кремнии, W_A – толщина активной базы, W_{C0} – ширина коллекторного перехода без напряжения, U_{dc} – потенциальный барьер между базой и коллектором, U_C – напряжение на коллекторе, N – концентрация доноров, τ_0 – время жизни до облучения, τ_Φ – время жизни при облучении, Φ – доза облучения и k_τ – коэффициент радиационного изменения времени жизни дырок в базе транзистора.

Решая (7 – 11), находим распределение неосновных неравновесных носителей по базе транзистора, а по (12) – токи через переходы в условиях облучения.

Зависимость коэффициента усиления p - n - p биполярного транзистора от дозы облучения при различных значениях тока базы представлены на рис. 2. Облучение производилось гамма-квантами ^{60}Co с энергией 1,2 МэВ.

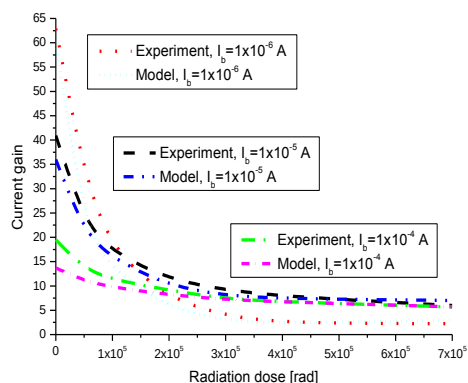


Рис. 2. Выходные характеристики транзистора до и после облучения

В зависимости от тока базы значение коэффициента усиления падает в несколько раз по сравнению с начальным. Так, в случае тока базы 10 мкА коэффициент усиления падает в 4 раза при облучении γ -квантами с дозой $3 \cdot 10^5$ rad. Та же доза при токе базы 100 мкА вызывает падение коэффициента усиления менее чем наполовину.

Отсюда следует, что радиационная стойкость выше у биполярного транзистора, работающего при большем токе базы, но при этом падает его эффективность как усилителя.

Эффекты отдельных высокоэнергетических частиц

Эффекты при воздействии на твердое тело отдельных высокоэнергетических частиц рассматривались на примере локального всплеска температуры при облучении структур SiO_2/Si ионами F, S, Cl, Ar, Kr и Xe с энергиями от 28 до 200 МэВ. Моделирование производилось с использованием модели термического пика [6].

Результаты расчетов показывают, что облучение ионами ^{84}Kr (59 МэВ) и ^{132}Xe (133, 167 и 200 МэВ) приводит к образованию протяженных дефектных областей (треков) в слоях диоксида кремния радиусом более 3 нм. Длина их значительно превышает толщину подзатворного диэлектрика в типичной МОП-структуре.

Облучение кремния ионами ^{132}Xe с энергией 167 МэВ приводит к образованию области, нагретой до температуры плавления, радиусом 7.2 нм, менее чем на 1 пс. Такого кратковременного воздействия, очевидно, недостаточно для формирования длительно сохраняющихся областей с измененной структурой [7].

Однако, пиковые концентрации свободных носителей в трековой области настолько высоки, что могут привести к ложным срабатываниям и выходу из строя приборов. Расчеты на основе квантового диэлектрического формализма [8] концентрации первичных электронов, возбужденных при прохождении ионов Xe, Bi и U в кремнии, показывают, что 10-12 % от всего количества валентных электронов кремния в центральной области трека радиусом 1.1–1.2 нм, переходят в зону проводимости при взаимодействии с тяжелым ионом, что является нижней границей оценки. На рис. 3 показаны максимальные радиусы расплавленных областей в SiO_2 при облучении ионами различных масс и энергий.

Для учета всех вторичных электронов и электронов последующих поколений необходим детальный расчет методом Монте-Карло, учитывающий реальную зонную структуру кремния, а также рекомбинацию, диффузию и дрейф носителей, и баллистический транспорт высокоэнергетических электронов.

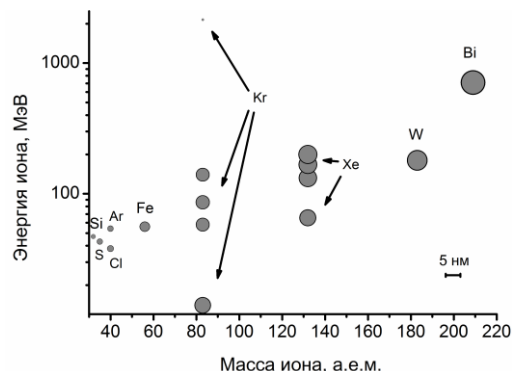


Рис. 3. Рассчитанные максимальные радиусы расплавленных областей в SiO_2 при облучении ионами различных масс и энергий

Заключение

Таким образом, при работе полупроводниковых структур в условиях радиационного облучения, в том числе и в космической среде, их важнейшие характеристики могут изменяться в несколько раз по сравнению с проектными. Разработанные нами модели позволят прогнозировать подобные изменения и вносить необходимые поправки на этапе проектирования радиационно-стойких полупроводниковых приборов.

Список литературы

1. Левин, М.Н. [и др.] // Микроэлектроника. 2006. Т. 35. № 5. С. 382 – 391.
2. Согоян А.В. [и др.] Модель космоса: в 2 т. МГУ им. М. В. Ломоносова. 8-е изд. М.: КДУ. 2007. Т. 2. С. 466–493.
3. Galina Zayats et al. // American Journal of Nano Research and Application. 2017. V. 5. I.1. P.7-11.
4. Вологдин Э.Н. [и др.] Радиационная стойкость биполярных транзисторов. М. 2000. 101 р.
5. Степаненко И. [и др.] Основы транзисторов и транзисторных схем. М. 1977. 672 р.
6. Власукова Л.А. [и др.] // Доклады НАНБ. 2007. Т. 51. № 5. С. 65 – 70.
7. Wesch W. et al. // Springer. 2016. 534 pp.
8. Буренков А.Ф. [и др.] // ЖЭТФ. 1980. Т. 78. № 4. С. 1474–1489.

SIMULATION OF IMPACT OF PENETRATING RADIATION ON BIPOLAR AND MOS TRANSISTORS

Siarhei Miskiewicz¹, Vera Yuvchenko¹, Alexander Komarov¹, Galina Zayats², Vladimir Bozhatkin³

¹Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarussian State University,
7 Kurchatov Str., 220045 Minsk, Belarus, komarAF@bsu.by

²Institute of mathematics, BAS, 11 Surganov str., 220072 Minsk, Belarus

³OJSC Integral, 121A Kazintsa str., Minsk, Belarus

The radiation effects in the solids and the radiation-induced changes in the operational characteristics of MOS and bipolar semiconductor structures under the particle and EM radiation have been considered. The numerical simulations of the radiation-induced changes in the MOS threshold voltage due to X-rays, the radiation-induced changes in the BJT current gain due to 1.2 MeV γ -ray irradiation and the radiation effects in silicon structures due to single high-energy heavy particles have been performed. The results of simulation show the significant degradation of the operational characteristics of semiconductor devices that can be the cause of the critical malfunction.