

TCAD моделирование характеристик кремниевых и кремний-германиевых биполярных транзисторов с учетом радиационных эффектов

К.О. Петросянц^{1,2}, М.В. Кожухов¹

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики), kpetrosyants@hse.ru

²Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

Аннотация — В систему приборно-технологического проектирования Sentaurus Synopsys включены новые модели, учитывающие влияние облучения нейтронами, протонами и гамма-квантами. Общая концепция моделей основана на учете влияния ионизационных эффектов и дефектов смещения на электрофизические параметры τ , S , N_{it} , Q_{ox} . Представлены результаты сравнения смоделированных и экспериментальных характеристик Si и SiGe биполярных транзисторов до и после радиационного воздействия. Погрешность 10-20% в широком диапазоне потоков и доз.

Ключевые слова — кремниевые биполярные транзисторы, кремний-германиевые гетеропереходные биполярные транзисторы, приборно-технологическое моделирование, радиационное излучение, нейтроны, протоны, гамма-кванты.

I. ВВЕДЕНИЕ

Успешное решение задач проектирования и разработки радиационно-стойких кремниевых биполярных транзисторов (Si БТ) и кремний-германиевых гетеропереходных биполярных транзисторов (SiGe ГБТ), а также интегральных схем на их основе в настоящее время невозможно без применения систем автоматизированного проектирования.

На стадии разработки полупроводниковых приборов только экспериментальные подходы, использующие тестовые структуры, не позволяют исчерпывающе оценить влияние радиационных эффектов на характеристики полупроводниковых приборов. Кроме того, следует учитывать, что экспериментальные исследования радиационной стойкости тестовых образцов приборов являются достаточно дорогостоящими и трудоемкими. В этой связи важное значение приобретают методы моделирования на приборно-технологическом уровне.

В настоящее время для приборно-технологического моделирования широко применяются коммерческие программы Sentaurus Synopsys [1] и SILVACO TCAD [2].

В программу Sentaurus Synopsys входят модели учета стационарного гамма-излучения и воздействия

ОЯЧ¹ [3]. Учет влияния гамма-излучения в Sentaurus Synopsys осуществляется моделью, которая описывает количество носителей заряда, оставшихся после процессов первичной рекомбинации в локальных объемах структуры прибора. Однако этого не достаточно для адекватного моделирования электрических характеристик Si БТ и SiGe ГБТ с учетом гамма-излучения, так как не учитываются два основных эффекта: 1) образование поверхностных состояний; 2) изменение скорости поверхностной рекомбинации.

В TCAD фирмы SILVACO включены модели, учитывающие воздействие ОЯЧ¹, а также влияние структурных дефектов и ионизационных эффектов в структуре прибора. Однако, данные модели были адаптированы только к простейшей структуре МОП транзистора, и пока не пригодны для структур Si БТ и SiGe ГБТ.

В работах [4], [5] для приборно-технологического моделирования использованы встроенные в TCAD стандартные модели, учитывающие влияние одного вида радиации – гамма-излучения. Эти модели используются только для изучения распределения заряда в объеме оксида SiO₂ без последующей оценки его влияния на характеристики Si БТ и SiGe ГБТ.

В работе [6] исследовались радиационные эффекты в диодах и транзисторах после импульсного гамма-нейтронного воздействия путем учета распределения ловушек в объеме приборов. Однако, при этом не учитывались радиационные изменения параметров материалов, влияние на радиационную стойкость уровня легирования базы, а также ряд других эффектов.

Следует отметить, что во всех работах рассматривается исключительно воздействие гамма-квантов, а публикации по учету воздействия нейтронов и протонов в системе TCAD отсутствуют.

Настоящая работа направлена на устранение имеющихся недостатков. Авторами разработаны и включены в существующие версии системы TCAD адекватные модели для расчета и прогнозирования

¹ Влияние ОЯЧ на характеристики п/п приборов является предметом самостоятельного исследования и в настоящей работе не рассматривается

деградации основных электрофизических параметров и электрических характеристик Si БТ и SiGe ГБТ при облучении различными видами стационарных радиационных излучений (нейтронами, протонами и гамма-квантами) в практически важных диапазонах доз и энергий.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В СИСТЕМЕ TCAD

Математической основой системы TCAD является численное решение фундаментальной системы уравнений физики полупроводниковых приборов, которая для диффузионно-дрейфового механизма переноса носителей состоит из следующих уравнений: плотности тока электронов и дырок (1) – (2); плотности поверхностного тока (3); Пуассона для распределения электростатического потенциала (4); темпа рекомбинация Шокли-Рида-Холла (5), концентрации равновесных носителей (6); темпа Оже рекомбинации (7); скорости поверхностной рекомбинации (8); непрерывности (9), энергетического баланса для электронов, дырок и кристаллической решетки (10) – (11):

$$\vec{j}_n = \mu_n \cdot (n \nabla E_c + kT_n \nabla n - nkT_n \nabla \ln \gamma_n + \lambda_n f_n^{td} kn \nabla T_n - 1,5nkT_n \nabla \ln m_n); \quad (1)$$

$$\vec{j}_p = \mu_p \cdot (p \nabla E_v + kT_p \nabla p - pkT_p \nabla \ln \gamma_p + \lambda_p f_p^{td} kp \nabla T_p - 1,5pkT_p \nabla \ln m_p); \quad (2)$$

$$j_{n,surf} = -qns_n, j_{p,surf} = -qns_p; \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \varphi + \vec{P}) = -q(p - n + N_D - N_A) - \rho_{trap}; \quad (4)$$

$$R_{net}^{SRH} = \frac{np - n_{i,eff}^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)}; \quad (5)$$

$$n_1 = n_{i,eff} \cdot \exp\left(\frac{E_{trap}}{kT}\right), p_1 = n_{i,eff} \cdot \exp\left(\frac{E_{trap}}{kT}\right); \quad (6)$$

$$R_{net}^A = (C_n n + C_p p) \cdot (np - n_{i,eff}^2); \quad (7)$$

$$R_{surf,net}^{SRH} = \frac{np - n_{i,eff}^2}{(n + n_1)/s_p + (p + p_1)/s_n}; \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = qR_{net,n} + q \frac{\partial n}{\partial t}, -\nabla \cdot \vec{J}_p = qR_{net,p} + q \frac{\partial p}{\partial t}; \quad (9)$$

$$\frac{\partial W_n}{\partial t} + \Delta \cdot \vec{S}_n = \vec{J}_n \cdot \frac{\nabla E_c}{q} + \frac{\partial W_n}{\partial t} \Big|_{coll}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial W_p}{\partial t} + \Delta \cdot \vec{S}_p = \vec{J}_p \cdot \frac{\nabla E_v}{q} + \frac{\partial W_p}{\partial t} \Big|_{coll}, \frac{\partial W_L}{\partial t} + \Delta \cdot \vec{S}_L = \frac{\partial W_L}{\partial t} \Big|_{coll}; \quad (11)$$

где: ε – диэлектрическая постоянная; q – заряд электрона; (n, p) , (j_n, j_p) , (μ_n, μ_p) , (τ_n, τ_p) – концентрация, плотность тока, подвижность, время жизни электронов и дырок соответственно; γ_n и γ_p – функции, зависящие от концентрации носителей; E_c и E_v – края зоны проводимости и валентной зоны; λ_n и λ_p – функции, зави-

сящие от интеграла Ферми-Дирака; f_n^{td} и f_p^{td} – тепловые диффузионные константы; m_n и m_p – эффективная масса электронов и дырок; P_n, P_p, ϕ_n, ϕ_p – абсолютная термоЭДС, квазипотенциал Ферми электронов и дырок соответственно; S_n и S_p – энергетические потоки; W_n, W_p и W_L – плотности энергии; T – температура решетки; N_D, N_A – концентрации легирующей примеси доноров и акцепторов в транзисторной структуре; ρ_{trap} – заряд, обусловленный захватом носителей ловушками; $n_{i,eff}$ – внутренняя концентрация носителей; s_n, s_p – скорости поверхностной рекомбинации электронов и дырок соответственно; C_n, C_p – коэффициенты Оже; G – скорость генерации; R – скорость рекомбинации.

Для описания субмикронных полупроводниковых структур достаточно использовать диффузионно-дрейфовую модель переноса носителей заряда. В этих случаях из общей системы уравнений исключаются уравнения энергетического баланса (10) – (11). Следует отметить, что в уравнениях (1) – (11) электрофизические параметры (τ_n, τ_p) , (μ_n, μ_p) , (s_n, s_p) , ρ_{trap} , а также ряд других параметров, в явном виде не представленных в уравнениях (1) – (11), являются радиационно-зависимыми.

Авторами разработаны радиационные модели электрофизических параметров τ, S, Q_{it}, Q_{ox} структур Si БТ и SiGe ГБТ, которые включены в программу Sentaurus Synopsys (см. рис. 1), что позволило с достаточной точностью проводить моделирование биполярных структур при воздействии нейтронного, протонного и гамма-излучений.

III. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ Si БТ И SiGe ГБТ В TCAD

A. TCAD модель, учитывающая влияние нейтронного излучения на характеристики БТ

При воздействии нейтронов в структуре БТ в результате образования дефектов смещения и разупорядоченных областей происходит изменение основных электрофизических параметров, таких как время жизни неосновных носителей заряда (τ), подвижность (μ) и концентрация неравновесных носителей заряда (n), которые вызывают увеличение тока базы и уменьшение коэффициента усиления по току SiGe ГБТ [7], [8].

Основным фактором, влияющим на изменение характеристик SiGe ГБТ, является время жизни, при этом изменение концентрации и подвижности неравновесных носителей заряда в современных транзисторах незначительно и в практически важных случаях можно не учитывать [9].

В работах [10], [11] проводились исследования влияния на ток базы SiGe ГБТ образования дефектов смещения в области пространственного заряда и в области базы. Было показано, что, наряду с областями ОПЗ, существенный вклад в деградацию тока базы SiGe ГБТ вносят пассивная и активная базовые области.

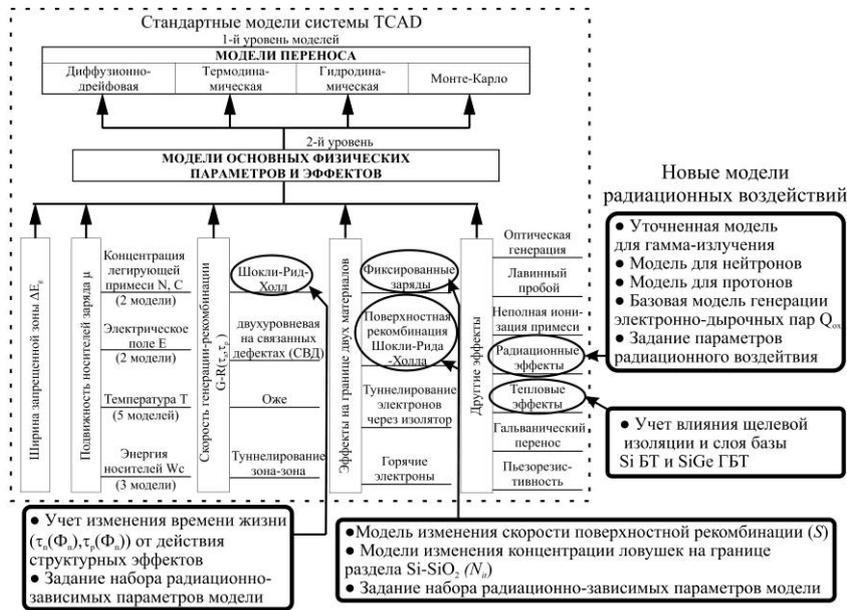


Рис. 1. Новые модели электрофизических эффектов, учитывающие воздействие нейтронного, протонного и гамма-излучений и включенные в стандартную среду моделирования TCAD

В известных версиях системы TCAD отсутствует модель, учитывающая влияние нейтронного излучения на характеристики Si БТ и SiGe ГБТ, поэтому в стандартную TCAD-модель рекомбинации Шокли-Рида-Холла для времени жизни носителей заряда нами была введена дополнительная зависимость от интегрального потока нейтронов:

$$\frac{1}{\tau_\phi} = \frac{1}{\tau_0} + \Phi_n \cdot K_\tau, \quad (12)$$

где: τ_ϕ , τ_0 – время жизни носителей заряда после и до облучения соответственно; Φ_n – флюенс нейтронов; K_τ – коэффициент радиационного изменения времени жизни.

Основной проблемой создания модели является выбор параметра K_τ . В большинстве работ K_τ определяется из эмпирических выражений Грегори [12]. Однако они не учитывают зависимость K_τ от уровня легирования базы транзистора, что особенно важно при моделировании SiGe ГБТ, концентрация примеси в базе которых достигает $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и выше. Поэтому нами в модель были введены новые, более точные зависимости K_τ от концентрации легирующей примеси и уровня инжекции [13]:

для n-типа:

$$K_{\tau_n} = a + b \cdot \left[\ln \left(\frac{n_{неосн} + n_i}{n_{осн}} \right) \right]^2 + c \cdot \ln \left(\frac{N_{осн}}{n_i} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{d}{\delta} + 1 \right) \right]^{0.5}; \quad (13)$$

для p-типа:

$$K_{\tau_p} = a + f \cdot \ln \left(\frac{N_{осн}}{m} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{n_{неосн} + n_i}{n_{осн}} \right) \right]^2, \quad (14)$$

где δ – уровень инжекции; $N_{прим}$ – концентрация легирующей примеси; n_i – собственная концентрация носителей заряда; $n_{осн}$, $n_{неосн}$ – концентрация основных и неосновных носителей заряда; a, b, c, d, e, f, m – коэффициенты, определяемые подгонкой под эксперимент.

Для моделирования влияния нейтронного облучения на структуры Si БТ и SiGe ГБТ в систему TCAD с помощью интерфейса физических моделей (PMI) в модель времени жизни были добавлены выражения (12) – (14).

Ниже приведен пример, в котором модель радиационных эффектов, учитывающая нейтронное излучение, использовалась для расчета Si БТ 2Т378 с параметрами: коэффициент усиления по току $\beta = 70$, граничная частота $f_T = 1,9$ ГГц и максимальная частота $f_{max} = 5,1$ ГГц. Для расчета в TCAD структура БТ 2Т378 была воссоздана с использованием его технологической карты и топологии (см. рис. 2).

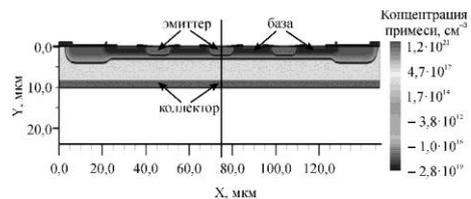


Рис. 2. Часть структуры Si БТ 2Т378

На рис. 3 представлены экспериментальные и смоделированные с использованием уточненных выражений (13) и (14) значения коэффициента усиления по току БТ 2Т378, полученные до и после облучения нейтронами с потоком $\Phi = 4 \cdot 10^{13} \text{ н/см}^2$.

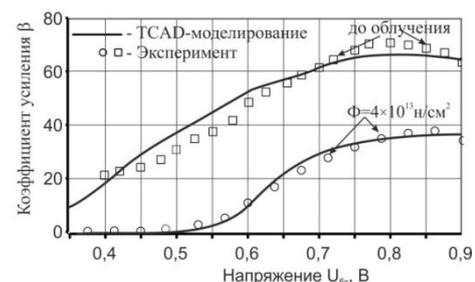


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления по току β БТ 2Т378 от напряжения база-эмиттер до и после облучения потоком $\Phi_n = 4 \cdot 10^{13} \text{ н/см}^2$

Для структуры SiGe ГБТ, изготовленного по 0,13 мкм технологии БиКМОП 8WL с параметрами $\beta = 250$, $f_T = 100$ ГГц, $f_{max} = 200$ ГГц [14], на рис. 4 и 5 приведены: фактор повреждения коэффициента усиления ($d_n = \beta(\Phi_n)/\beta(0)$, где $\beta(\Phi_n)$ и $\beta(0)$ – коэффициенты усиления после и до облучения соответственно), рассчитанный с помощью выражений Грегори и улучшенной модели, (см. рис. 4) и смоделированная максимальная частота усиления SiGe ГБТ 8WL (см. рис. 5) до и после воздействия нейтронного излучения с разными интегральными потоками.

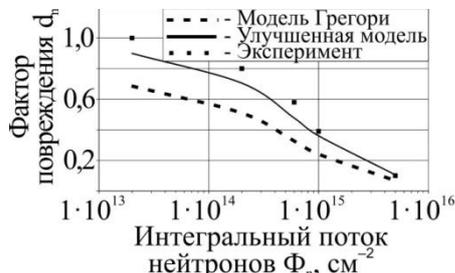


Рис. 4. Зависимость фактора повреждения коэффициента усиления SiGe ГБТ 8WL от потока нейтронов

На рис. 4 видно, что модель Грегори для K_T дает большую погрешность и требует коррекции.

В табл. 1 и 2 приведены численные значения коэффициентов в выражениях (13) и (14), которые были использованы при моделировании характеристик Si БТ и SiGe ГБТ на рис. 3 – 5 [15], [16].

Таблица 1

Численные значения коэффициентов для n-типа

Коэффициенты для K_{Tn}	a , $см^2/с$	b , $см^2/с$	c , $см^2/с$	d
для SiGe	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$9,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$
для Si	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$8,8 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2

Численные значения коэффициентов для p-типа

Коэффициенты для K_{Tp}	a , $см^2/с$	f , $см^2/с$	m , $см^{-2}$
для SiGe	$3,10 \cdot 10^{-7}$	$1,05 \cdot 10^{-8}$	$4,12 \cdot 10^{12}$
для Si	$1,80 \cdot 10^{-7}$	$7,05 \cdot 10^{-9}$	$4,12 \cdot 10^{12}$

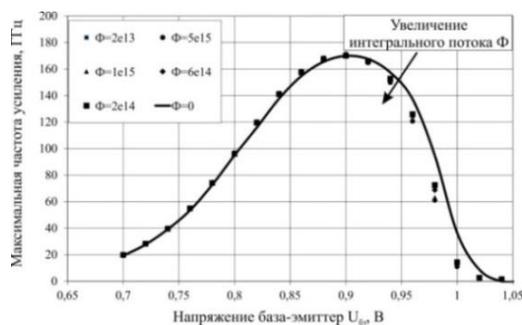


Рис. 5. Максимальная частота усиления f_{max} SiGe ГБТ для различных значений флюенса нейтронов

Из рис. 4 и 5 видно, что при облучении нейтронами коэффициент усиления β сильно деградирует, а максимальная частота f_{max} изменяется слабо. Этот факт подтверждается результатами экспериментальных работ [17], [18]. Таким образом, можно сделать вывод, что модель (12) – (14) адекватно описывает ВАХ, параметр усиления β и частотные характеристики в практически важном диапазоне потока нейтронов с погрешностью 10-20%.

В. TCAD модель, учитывающая воздействие гамма-излучения на характеристики БТ

Модели физических эффектов, имеющиеся в стандартных версиях TCAD, недостаточны для моделирования биполярных структур, облученных гамма-квантами, так как не учитывают два важных эффекта: 1) образование ловушек на границе раздела Si/SiO₂; 2) изменение скорости поверхностной рекомбинации. Поэтому для адекватного моделирования с учетом влияния гамма-излучения на характеристики Si БТ и SiGe ГБТ в системе TCAD, наряду с уже имеющейся моделью учета изменения заряда в SiO₂ (Q_{ox}), были добавлены выражения, описывающие концентрацию ловушек (N_{it}) на границе раздела Si/SiO₂ в зависимости от дозы гамма-излучения D_γ :

$$N_{it}(D_\gamma) = a_{it} D_\gamma^{b_{it}}, \quad (15)$$

а также изменение скорости поверхностной рекомбинации (S):

$$S(D_\gamma) \cong \sigma \cdot v_{th} \cdot N_{it}(D_\gamma), \quad (16)$$

где: $\sigma = \sqrt{\sigma_n \cdot \sigma_p}$; σ_n , σ_p – сечения захвата электрона и дырки ловушкой соответственно; v_{th} – тепловая скорость электрона; a_{it} , b_{it} – численные коэффициенты.

Зависимость концентрации радиационно-индуцированных ловушек на границе раздела Si/SiO₂ от дозы определяется из эксперимента (см. рис. 6) [19].

Из рис. 6 (а) видно, что концентрация ловушек на границе Si-SiO₂, примыкающей к поверхностным областям рп-перехода, больше по величине, чем на границе вдоль щелевой изоляции. Так как кривые на рис. 6 (а) имеют участки насыщения, то рост скорости поверхностной рекомбинации S также будет замедляться в области больших значений поглощенной дозы D_γ (см. рис. 6 (б)). Для биполярного транзистора это, как правило, приводит к уменьшению деградации ВАХ при больших дозах.

В программе Sentaurus Synopsys для учета изменения скорости поверхностной рекомбинации в модель поверхностной рекомбинации Шокли-Рида-Холла (SRHsurface) были добавлены выражения (15) и (16). При этом параметр Q_{ox} рассчитывается с использованием стандартных физических моделей, имеющихся в Sentaurus Synopsys.

С использованием модели, учитывающей образование ловушек и изменение скорости поверхностной рекомбинации на границе раздела Si/SiO₂, была рассчитана структура n-p-n Si БТ 2Т391 с параметрами $\beta = 30$, $f_T = 5$ ГГц. Для этого в TCAD была воссоздана его структура (см. рис. 7).

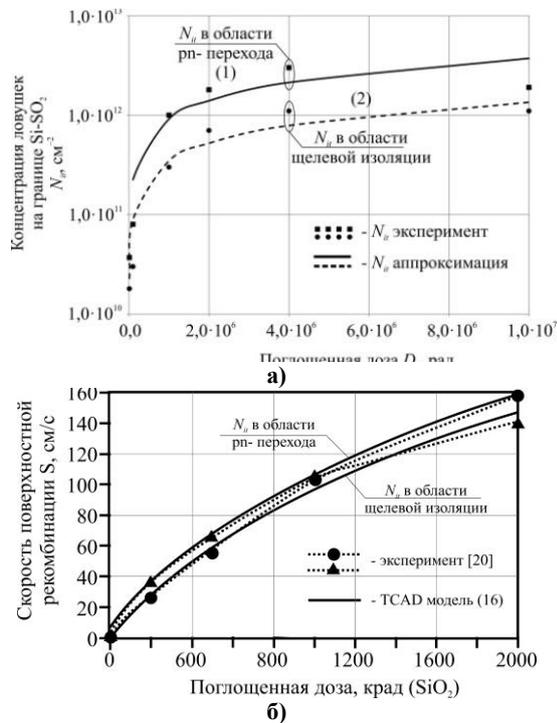


Рис. 6. а) Зависимость концентрации ловушек N_{it} на границе раздела Si/SiO₂ от поглощенной дозы D_γ в области выхода на поверхность np-перехода (1) (параметры $a_{it} = 2 \cdot 10^8 \text{ рад}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, $b_{it} = 0,61$) и в области щелевой изоляции (2) (параметры $a_{it} = 1 \cdot 10^8 \text{ рад}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, $b_{it} = 0,59$); б) зависимость скорости поверхностной рекомбинации S от поглощенной дозы D_γ

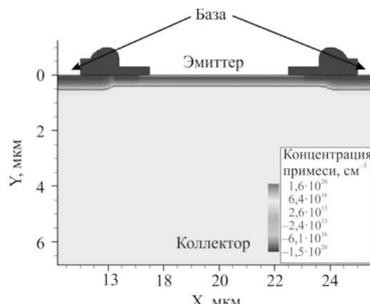


Рис. 7. Часть структуры n-p-n Si БТ 2Т391

На рис. 8 представлены результаты сравнения рассчитанных значений коэффициента усиления БТ 2Т391 с экспериментом до и после воздействия гамма-излучения. Погрешность моделирования составляет 10-20%.

На рис. 8 видно, что исходная TCAD модель для гамма-квантов, учитывающая только зависимости $Q_{ss}(D)$ и $Q_{ox}(D)$, дает большую погрешность. Для адекватного моделирования к исходной модели необходимо добавить зависимости (16) и (17) для $N_{it}(D)$ и $S(D)$.

С. TCAD модель, учитывающая влияние протонного излучения

При облучении протонами деградация электрических характеристик биполярных транзисторов обусловлена совместным действием структурных (аналогично нейтронному излучению) и ионизационных (аналогично гамма-излучению) эффектов.

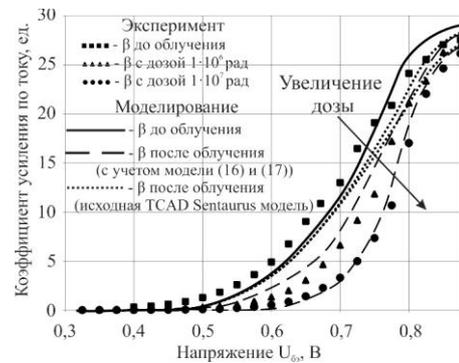


Рис. 8. Коэффициент усиления по току БТ 2Т391 до и после гамма-облучения с дозами $1 \cdot 10^6$, $1 \cdot 10^7$ рад

Для их корректного использования необходимо определить значения потока нейтронов и дозы гамма-излучения, которые эквивалентны по своему воздействию протонному излучению. Для этого использовались следующие уравнения для определения эквивалентного потока нейтронов и эквивалентной поглощенной дозы гамма-излучения:

$$\Phi_n = K_{cp} \cdot \Phi_p; D_\gamma = \delta_{ip}(E) \cdot \Phi_p, \quad (17)$$

где $K_{cp} = \delta_{cn}(E)/\delta_{cp}(E)$; $\delta_{cn}(E)$, $\delta_{cp}(E)$ – удельная поглощенная доза для нейтронного и протонного излучения в зависимости от энергии [21]; $\delta_{ip}(E)$ – удельная поглощенная доза протонов [22].

Для исследования радиационной стойкости к протонному воздействию был выбран SiGe ГБТ, изготовленный по 0,18 мкм БиКМОП технологии 7НР с $\beta = 250$, $f_T = 120$ ГГц, $f_{max} = 100$ ГГц [23]. Структура SiGe ГБТ изображена на рис. 9.

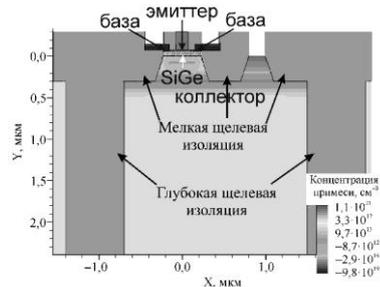


Рис. 9. Структура SiGe ГБТ

Важным преимуществом TCAD моделирования является возможность детального анализа физических эффектов в структуре прибора, обусловленных воздействием радиации. На рис. 10 представлены изменения темпа рекомбинации носителей заряда в структуре SiGe ГБТ при воздействии протонного излучения, вызванные структурными повреждениями. Видно, что наибольшие изменения наблюдаются в области базы.

На рис. 11 представлено перераспределение носителей заряда в структуре SiGe ГБТ при воздействии протонного излучения, вызванное ионизационными эффектами, а именно – накоплением заряда в оксиде SiO₂, а также увеличением концентрации ловушек и скорости поверхностной рекомбинации на границе оксид-полупроводник.

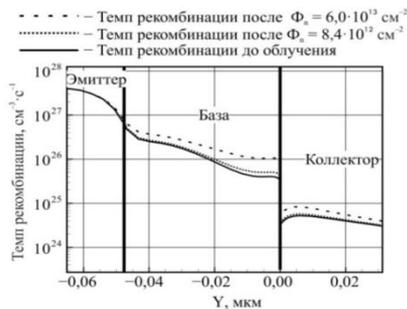


Рис. 10. 1D распределение темпа рекомбинации в активной области SiGe ГБТ после облучения протонами

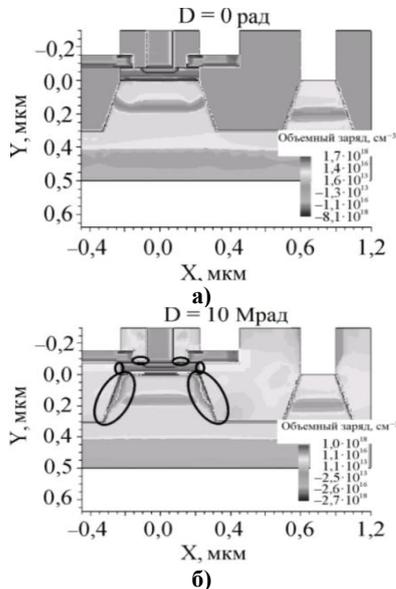


Рис. 11. 2D распределение пространственного заряда в структуре SiGe ГБТ 7HP после облучения протонами

Сравнение экспериментального и смоделированного коэффициента усиления по току до и после облучения SiGe ГБТ 7HP представлено на рис. 12.

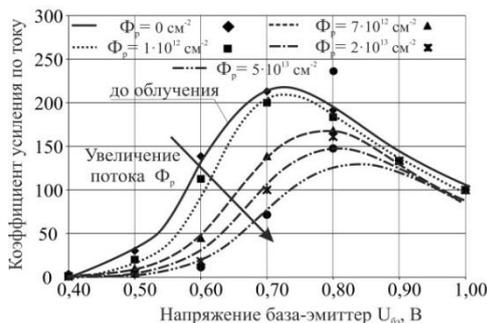


Рис. 12. Сравнение смоделированного (линии) и экспериментального (точки) коэффициента усиления по току SiGe ГБТ 7HP

Для исследования влияния протонного излучения на характеристики SiGe ГБТ 7HP была определена разница $\Delta J_{\delta} = J_{\delta}(D_p) - J_{\delta}(0)$ между плотностями тока базы при напряжении $U_{6e} = 0,7$ В до $J_{\delta}(0)$ и после $J_{\delta}(D_p)$ облучения протонами. На рис. 13 показано сравнение экспериментального и смоделированного параметра ΔJ_{δ} , а также приведены его ионизационная и структурная составляющие.

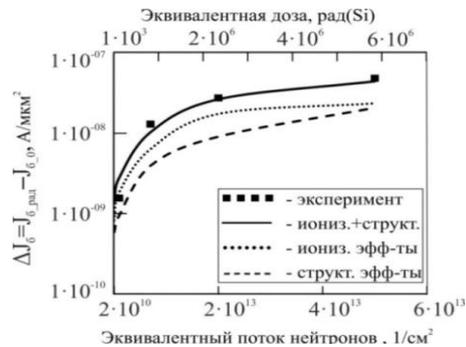


Рис. 13. Радиационно-индуцированная плотность тока базы SiGe ГБТ 7HP после протонного облучения

Погрешность моделирования статических ВАХ и параметра β составляет 10-20%.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе стандартной коммерческой TCAD Sentaurus Synopsys разработана RAD-TCAD версия для адекватного моделирования электрофизических и электрических характеристик Si БТ и SiGe ГБТ с учетом влияния нейтронного, протонного и гамма-излучений.

С этой целью в стандартную САПР Sentaurus Synopsys встроены модели радиационных эффектов, которые учитывают:

- 1) изменения времен жизни носителей заряда τ_n , τ_p в структурах Si БТ и SiGe ГБТ от величины флюенса нейтронов и уровня инжекции и легирования активной области прибора;
- 2) образование ловушек и изменение скорости поверхностной рекомбинации на границе раздела Si/SiO₂ в структурах Si БТ и SiGe ГБТ после воздействия гамма-квантов;
- 3) совместное влияние ионизационных и структурных эффектов в структурах Si БТ и SiGe ГБТ при воздействии протонного излучения.

Адекватность встроенных в TCAD радиационных моделей отработана и подтверждена примерами моделирования Si БТ и SiGe ГБТ, изготовленных по различным отечественным и зарубежным технологиям.

Применение разработанных моделей позволяет значительно расширить возможности существующих приборно-технологических САПР, распространив их на расчёт радиационно-стойких БИС.

Калибровка и настройка моделей, учитывающих воздействие нейтронного, протонного и гамма-излучения, осуществляется путем подгонки параметров, входящих в выражения (12) – (17), под результаты измерения электрических параметров приборных структур Si БТ и SiGe ГБТ, а также их электрических характеристик, полученных после облучения отдельно для каждого вида облучения.

По опыту использования моделей погрешность описания статических ВАХ субмикронных Si БТ и SiGe ГБТ не превышает 10–15% в широком диапазоне доз до $1 \cdot 10^7$ рад и интегральных потоков до $1 \cdot 10^{16}$ см⁻², частотных характеристик – 15-20% в том же диапазоне доз и потоков.

ПОДДЕРЖКА

Статья подготовлена в ходе проведения исследования №15-01-0165 в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)» в 2016 г. и гранта РФФИ №14-29-09145.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] TCAD Sentaurus User Manual J-2014.09, Synopsis.
- [2] <http://www.silvaco.com/products>.
- [3] Ачкасов В.Н., Смерек В.А., Уткин Д.М., Зольников В.К. Методы обеспечения стойкости микросхем к одиночным событиям при проектировании радиационно-стойких микросхем // Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемповского. М.: ИППМ РАН, 2012. С. 634-637.
- [4] Graves R. J. at el. Modeling low-dose-rate effects in irradiated bipolar-base oxides // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1998. Vol. 45. №. 6. P. 2352-2360.
- [5] Sutton A. K., Cressler J. D. at el. The Effects of Proton and X-Ray Irradiation on the DC and AC Performance of Complementary (nnp + pnp) SiGe HBTs on Thick-Film SOI // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2007. Vol. 54. No. 6. P. 2245 – 2250.
- [6] Панкратов А.Е., Тарасова Е.А., Оболенская Е.С. и др. Влияние радиационно-стимулированной диффузии на процессы восстановления работоспособности планарных диодов и транзисторов после импульсного гамма-нейтронного воздействия // Сборник «Стойкость-2015». – Мос. обл., г. Лыткарино, 2015. С. 63-64.
- [7] H. J. Barnaby, S. K. Smith, R. D. Schrimpf, at el. Analytical model for proton radiations effects in bipolar devices // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2002. Vol. 49. P. 2643–2649.
- [8] S. Díez, M. Lozano, G. Pellegrini, at el. Proton Radiation Damage on SiGe:C HBTs and Additivity of Ionization and Displacement Effects // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2009. Vol. 56. No.4. P. 1931 – 1936.
- [9] Радиационная стойкость изделий ЭКБ: Научное издание / Под. ред. д-ра техн. наук, проф. А.И. Чумакова. М.: НИЯУ МИФИ. 2015. 512 с.
- [10] The effects of Proton Energy Effects in SiGe HBT Technology / S. Zhang., G. Niu, D. Cressler et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2002. Vol 49. № 6. P. 3208–3212.
- [11] Neutral Base Recombination and its Influence on the Temperature Dependence of Early Voltage and Current Dain-Early Volotage Product in UHV/CVD SiGe HBTs / A.J. Joseph, J.D. Cressler, D.M. Richey et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1997. Vol. NS-44. № 3. P. 404–4013.
- [12] Gregory B.L., Gwyn C.W. Application of neutron damage models to semiconductor device studies // IEEE Transactions on Nuclear Science. Dec. 1970. Vol. 17. No. 6. P. 325-33.
- [13] Вологдин Э.Н., Смирнов Д.С. Эмпирические соотношения для зависимости коэффициента радиационного изменения времени жизни носителей заряда в кремнии при нейтронном облучении от уровня инжекции и степени легирования // ВАИТ. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2010. Мос. обл., г. Лыткарино. С. 17-22.
- [14] Díez S., Wilder M., Ullan M. et al. Radiation hardness studies of a 130 nm Silicon Germanium BiCMOS technology with a dedicated ASIC //Proc. TWEPP. 2009. P. 439-442.
- [15] Petrosyants K.O., Kozhukhov M.V. SiGe HBT TCAD Simulation Taking into Account Impact of Proton Radiation // Proc. of 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). Oct. 2015. P. 1-4.
- [16] Petrosyants K., Vologdin E., Kozhukhov M. at el. Si BJT and SiGe HBT Performance Modelling after Neutron Radiation Exposure // Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium EWDTS`2011. Sept., 2011. P. 267-270.
- [17] Lourenco N. E. et al. Total dose and transient response of SiGe HBTs from a new 4th-Generation, 90 nm SiGe BiCMOS technology //Radiation Effects Data Workshop (REDW). 2012 IEEE. 2012. С. 1-5.
- [18] J. Cressler. Radiation Effects in SiGe Technology. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2013. Vol. 60. No. 3. P. 1992–2014.
- [19] Put S.; Simoen E., Huylenbroeck S., Van Claeys C., Van Uffelen M., Leroux P. Effect of Airgap Deep Trench Isolation on the Gamma Radiation Behavior of a 0.13 um SiGe:C NPN HBT Technology // IEEE Transactions on Nuclear Science. Aug. 2009. Vol. 56. No. 4. pp. 2198-2204.
- [20] S. L. Kosier, R. D. Shrimpf, R. N. Nowlin, D. M. Fleetwood, M. DeLaus, R. L. Pease, W. E. Combs, A. Wei, F. Chai, “Charge separation for bipolar transistors,” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 40, No. 6, pp. 1276-1285, Dec 1993.
- [21] Poivey C. and Hopkinson G. Displacement damage mechanism and effects // Proc. in ESA—EPFL Space Center Workshop 9. Jun. 2009.
- [22] Безродных И.П., Тютнев А.П., Семенов В.Т.. Радиационные эффекты в космосе. Часть 1. Радиация в околоземном космическом пространстве. М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014. 106 с.
- [23] Comeau J. P., Sutton A. K., Haugerud B. M., Cressler J. D., Kuo W. M. L., Marshall P. W. et al. Proton tolerance of advanced The SiGe HBTs fabricated on different substrate materials // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2004. Vol. 51. No. 6, P. 3743 – 3747.

TCAD simulation of Si BJT and SiGe HBT structures taking into account radiation effects

K.O. Petrosyants^{1,2}, M.V. Kozhukhov¹

¹ National Research University Higher School of Economics (Moscow Institute of electronics and mathematics), kpetrosyants@hse.ru

² Institute for Desing Problems in Microelectronics of RAS

Keywords — Si BJTs, SiGe HBTs, TCAD simulation, radiation effects, displacement damages, ionization effects, neutrons, protons, gamma-rays.

ABSTRACT

Si BJT and SiGe HBT performance degradation after irradiation is investigated using a new physical TCAD

model built into the Synopsys Sentaurus tool. New equations for the physical parameters τ , S , N_{it} taking into account radiation effects after neutron, proton and gamma-radiation are included in the program.

The following novelties were introduced into the Si BJT and the SiGe HBT TCAD model with account for radiation effects in:

- the improved equations for coefficients of radiation induced degradation of carrier lifetime K_{τ} that account for doping concentration in the active regions;
- dependencies of traps concentration $N_{it}(D_{\gamma})$ and surface recombination velocity $S(D_{\gamma})$ at Si-SiO₂ interfaces separately for EB-spacer and STI/DTI on absorbed dose D_{γ} taken from experiment;
- the TCAD model to account for the impact of proton radiation based on additivity of the ionization and displacement effects.

Comparison of simulated and experimental characteristics of the Si BJT and the SiGe HBT after subjection to doses up to $1 \cdot 10^7$ rad and fluences up to $1 \cdot 10^{16}$ cm⁻² shows the 10-20% error.

AFFILIATION

This work was supported by the National Research University–Higher School of Economics Academic Fund Program in 2016, grant No. 15-01-0165, and by Russian Foundation for Basic Research, grant No.14-29-09145.

REFERENCES

[1] TCAD Sentaurus User Manual J-2014.09, Synopsys.
 [2] <http://www.silvaco.com/products>.
 [3] Achkasov V.N., Smerek V.A., Utkin D.M., Zolnikov V.K. Metody obespechenija stojkosti mikroshem k odinochnym sobytijam pri proektirovanii radiacionno-stojkih mikroshem // Sbornik trudov / pod obshh. red. akademika RAN A.L. Stempkovskogo. Moscow, IPPM RAN, 2012. P. 634-637. (in Russian).
 [4] Graves R. J. at el. Modeling low-dose-rate effects in irradiated bipolar-base oxides // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1998. Vol. 45. No. 6. P. 2352-2360.
 [5] Sutton A. K., Cressler J. D. at el. The Effects of Proton and X-Ray Irradiation on the DC and AC Performance of Complementary (nnp + pnp) SiGe HBTs on Thick-Film SOI // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2007. Vol. 54. No. 6. P. 2245 – 2250.
 [6] Pankratov A.E., Tarasova E.A., Obolenskaja E.S et. al Vlijanie radiacionno-stimulirovannoj diffuzii na processy vosstanovlenija rabotosposobnosti planarnykh diodov i tranzistorov posle impul'snogo gamma-nejtronnogo vozdejstvija // Sbornik «Stojkost'-2015». – Mos. obl., g. Lytkarino, 2015. P. 63-64. (in Russian).
 [7] H. J. Barnaby, S. K. Smith, R. D. Schrimpf, at el. Analytical model for proton radiations effects in bipolar devices // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2002. Vol. 49. P. 2643–2649.
 [8] S. Diez, M. Lozano, G. Pellegrini, at el. Proton Radiation Damage on SiGe:C HBTs and Additivity of Ionization and Displacement Effects // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2009. Vol. 56. No.4. P. 1931 – 1936.

[9] Radiacionnaja stojkost' izdelij JeKB: Nauchnoe izdanie / Pod. red. d-ra tehn. nauk, prof. A.I. Chumakova. Moscow. NIJaU MIFI. 2015. 512 p. (in Russian).
 [10] The effects of Proton Energy Effects in SiGe HBT Technology / S. Zhang., G. Niu, D. Cressler et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2002. Vol 49. No. 6. P. 3208–3212.
 [11] Neutral Base Recombination and its Influence on the Temperature Dependence of Early Voltage and Current Dain-Early Volotage Product in UHV/CVD SiGe HBTs / A.J. Joseph, J.D. Cressler, D.M. Richey et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1997. Vol. NS-44. No. 3. P. 404–4013.
 [12] Gregory B.L., Gwyn C.W. Application of neutron damage models to semiconductor device studies // IEEE Transactions on Nuclear Science. Dec. 1970. Vol. 17. No. 6. P. 325-33.
 [13] Vologdin E.N., Smirnov D.S., “Empirical relations for dependence of the coefficient of radiation-induced alteration of carrier life time in silicon at the neutron irradiation from injection and doping level // VANT. Physics of radiation effects on radio-electronic equipment. vol. 2, pp. 17-22, Jun. 2010.
 [14] Diez S., Wilder M., Ullan M. et al. Radiation hardness studies of a 130 nm Silicon Germanium BiCMOS technology with a dedicated ASIC //Proc. TWEPP. 2009. P. 439-442.
 [15] Petrosyants K.O., Kozhukhov M.V. SiGe HBT TCAD Simulation Taking into Account Impact of Proton Radiation // Proc. of 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). Oct. 2015. P. 1-4.
 [16] Petrosyants K., Vologdin E., Kozhukhov M. at el. Si BJT and SiGe HBT Performance Modelling after Neutron Radiation Exposure // Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium EWDTs`2011. Sept., 2011. P. 267-270
 [17] Lourenco N. E. et al. Total dose and transient response of SiGe HBTs from a new 4th-Generation, 90 nm SiGe BiCMOS technology //Radiation Effects Data Workshop (REDW). 2012 IEEE. 2012. P. 1-5.
 [18] J. Cressler. Radiation Effects in SiGe Technology. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2013. Vol. 60. No. 3. P. 1992–2014.
 [19] Put S.; Simoen E., Huylenbroeck S., Van Claeys C., Van Uffelen M., Leroux P. Effect of Airgap Deep Trench Isolation on the Gamma Radiation Behavior of a 0.13 um SiGe:C NPN HBT Technology // IEEE Transactions on Nuclear Science. Aug. 2009. Vol. 56. No. 4. pp. 2198-2204.
 [20] S. L. Kosier, R. D. Shrimpf, R. N. Nowlin, D. M. Fleetwood, M. DeLaus, R. L. Pease, W. E. Combs, A. Wei, F. Chai, “Charge separation for bipolar transistors,” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 40, No. 6, pp. 1276-1285, Dec 1993.
 [21] Poivey C. and Hopkinson G. Displacement damage mechanism and effects // Proc. in ESA—EPFL Space Center Workshop 9. Jun. 2009.
 [22] Bezrodnih I.P. , Tyutnev A.P. , Semenov V.T. , “Radiation effects in Space environment. Part 1. Radiation in the near-Earth space,” Moscow, JCS Corporation ‘VNIIEM’, pp.64-65, 2014. (in Russian).
 [23] Comeau J. P., Sutton A. K., Haugerud B. M., Cressler J. D., Kuo W. M. L., Marshall P. W. et al. Proton tolerance of advanced The SiGe HBTs fabricated on different substrate materials // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2004. Vol. 51. No. 6, P. 3743 – 3747.