

## ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК SiGe ГБТ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРОТОНОВ

Петросянц К.О.<sup>1,2</sup>, Кожухов М.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (123458, ул. Таллинская, д. 34, к.713, kpetrosyants@hse.ru)

<sup>2</sup> Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (124365, Москва, Зеленоград, ул. Советская, д.3)

Кремний-германиевые (SiGe) гетеропереходные биполярные транзисторы (ГБТ) широко применяются в радиационно-стойкой аппаратуре в аэрокосмической отрасли, на установках физического эксперимента и в высокочастотных военных системах. Однако для разработки радиационно-стойких приборов и интегральных микросхем к воздействию протонного излучения требуется проведение исследований по влиянию ионизационных и структурных эффектов на характеристики SiGe ГБТ.

Для разработки приборов и интегральных микросхем, предназначенных для работы в условиях радиационного излучения, широко применяются приборно-технологические САПР (Synopsys Sentaurus [1], Silvaco [2]). Однако в представленных САПР отсутствуют физические модели, которые полностью учитывают влияние протонного излучения на характеристики SiGe ГБТ. Таки образом, невозможно проводить приборно-технологическое моделирование характеристик биполярных транзисторов с учетом всех эффектов при воздействии протонного излучения. Имеющиеся физические модели в САПР используются только для изучения распределения заряда в объеме SiO<sub>2</sub> без последующей оценки его влияния на характеристики SiGe ГБТ [3], [4]. Работ направленных на исследование прогнозирования радиационной стойкости SiGe ГБТ после облучения протонами не проводится.

Поэтому работа была направлена на разработку и добавление в Synopsys Sentaurus новой модели, учитывающей физические эффекты, вызванные воздействием протонного излучения на структуру биполярного транзистора и последующее изучение деградации электрических характеристик SiGe ГБТ с использованием Synopsys Sentaurus.

При воздействии протонного излучения на SiGe ГБТ происходит изменение основных электрофизических параметров, таких как время жизни неосновных носителей заряда, подвижность и концентрация

неравновесных носителей заряда, темпа рекомбинации, а также концентрация ловушек в объеме  $\text{SiO}_2$  и на границе  $\text{Si-SiO}_2$ , которые вызывают увеличение тока базы и уменьшения коэффициента усиления по току SiGe ГБТ [5]. Увеличение тока базы при воздействии протонного излучения обусловлено аддитивным влиянием ионизационной и структурной составляющие поглощенной дозы [6].

На практике воздействие протонного излучения заменяется совместным воздействием нейтронного и гамма-излучения. При этом нейтронное излучение используется для образования эффектов смещения [7], а гамма-излучение используется для создания ионизационных эффектов [8], [9].

При разработке физической модели учитывающей влияние протонного излучения был использован аналогичный подход. Учет деградации характеристик SiGe ГБТ вызванная дефектами смещения использовалась ранее разработанная модель для учета нейтронного излучения [10]. Учета деградации характеристик SiGe ГБТ из-за ионизационных эффектов использовалась физическая модель для гамма-излучения описанная ниже.

**Физическая модель для структурных эффектов.** Дефекты смещения, образующиеся в объеме полупроводникового материала, приводят к уменьшению времени жизни неосновных носителей заряда, подвижности и концентрации неравновесных носителей заряда. Известно, что основным факторов, влияющим на изменение характеристики SiGe ГБТ является время жизни, при этом изменение концентрации неравновесных носителей заряда в современных транзисторах не значительно и может не учитываться. Изменение подвижности является третьим порядком малости и в практически интересующих случаях этой зависимостью можно пренебречь.

Изменение времени жизни носителей заряда вызванное образованием структурных дефектов при воздействии протонного излучения моделировалось эквивалентным воздействием нейтронного излучения, создающим такое же количество структурных дефектов как и протонное излучение, которое описывается следующим уравнением:

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

где  $\tau_{\phi}$  - время жизни после облучения,  $\tau_0$  - время жизни до облучения,  $\Phi$  - флюенс нейтронов эквивалентный потоку протонов,  $K_{\tau}$  - коэффициент радиационного изменения времени жизни.

В большинстве работ  $K_\tau$  определяется из полу-эмпирических выражений Грегори [11]. Однако в данной модели отсутствует зависимость  $K_\tau$  от концентрации легирующей примеси. Поэтому в работе была использована улучшенная модель, в которой введена зависимость  $K_\tau$  от концентрации легирующей примеси [10]:

$$\text{для n-типа: } K_\tau = a + b \cdot \left[ \ln \left( \frac{n_{\text{неосн}} + n_i}{n_{\text{осн}}} \right) \right]^2 + c \cdot \ln \left( \frac{N_{\text{осн}}}{n_i} \right) \cdot \left[ \ln \left( \frac{d}{\delta} + 1 \right) \right]^{0.5}$$

$$\text{для p-типа: } K_\tau = a + f \cdot \ln \left( \frac{N_{\text{осн}}}{m} \right) \cdot \left[ \ln \left( \frac{n_{\text{неосн}} + n_i}{n_{\text{осн}}} \right) \right]^2$$

где  $n_{\text{неосн}}$ ,  $n_{\text{осн}}$  – концентрация неосновных и основных носителей заряда;  $\delta = n_{\text{неосн}} / n_{\text{осн}}$  – уровень инжекции;  $N_{\text{осн}}$  – концентрация легирующей примеси;  $n_i$  – собственная концентрация носителей заряда;  $a, b, c, d, f, m$  – численные коэффициенты.

В исходный код физической модели Synopsys Sentaurus времени жизни неравновесных носителей заряда, написанные на языке программирования C, были добавлены приведенные ранее выражения для учета влияния интегрального потока нейтронов. Далее модифицированные модели были скомпилированы и подключены при помощи программного интерфейса физически моделей (Physical Model Interface — PMI) в расчет электрических характеристик.

Последним шагом необходимо определить эквивалентный поток нейтронов, который образует такое же количество дефектов смещения, как и протонное излучение. Для определения эквивалентного потока нейтронов и последующего моделирования электрических характеристик SiGe ГБТ с учетом влияния структурных эффектов вызванных потоком протонов использовались следующие уравнения:

$$\Phi_n = K_{cp} \cdot \Phi_p \quad (4)$$

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 (см. рис. 1 [12]).

**Физическая модель для ионизационных эффектов.** В дополнение к структурным эффектам при воздействии протонного излучения в оксиде SiGe ГБТ образуется положительный заряд, а также образуются ловушки на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> (см. рис. 2 [7]) и также изменяется скорость поверхностной рекомбинации, что приводит к увеличению поверхностной рекомбинации. Таким образом, влияние ионизационные эффекты можно разложить на две составляющие. Первая состав-

ляющая это образование ловушек на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> и накопление положительного заряда в оксиде SiGe ГБТ под действием гамма-излучения. Вторая составляющая это зависимости скорости поверхностной рекомбинации от поглощенной дозы.

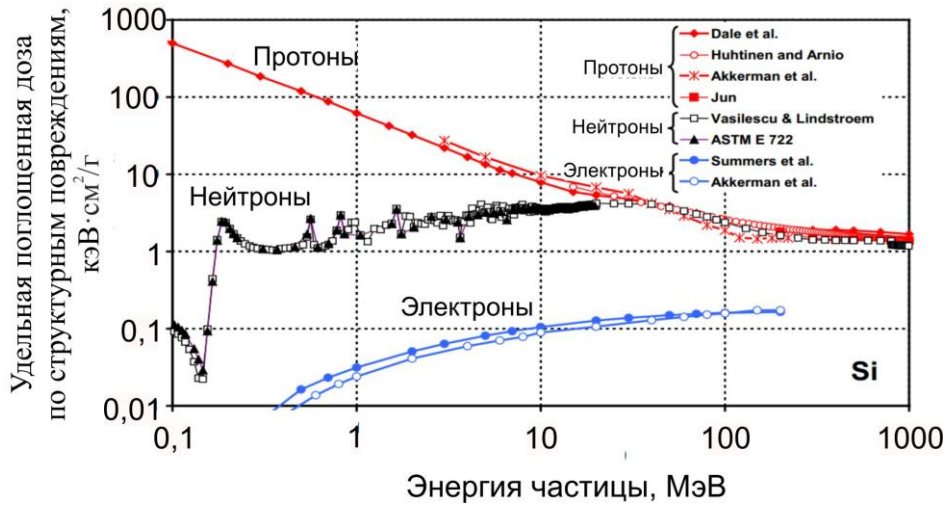


Рис.1. Удельная поглощенная доза в Si для нейтронного и протонного излучения для разных энергий частиц [12]

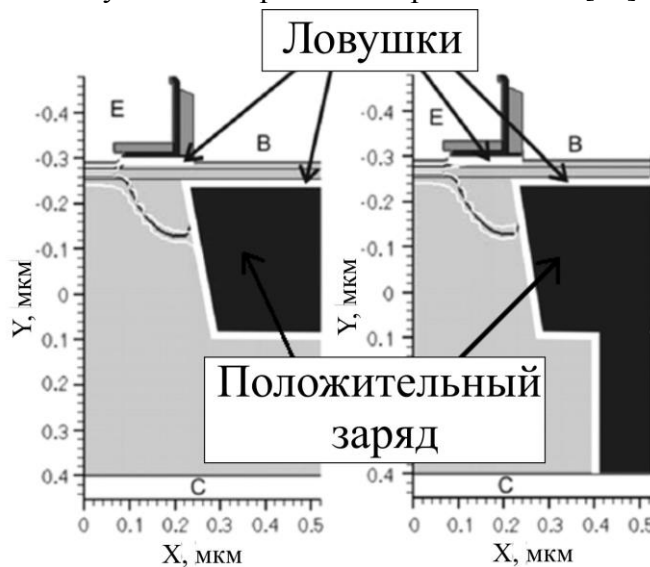


Рис.2. Ловушки на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> и положительный заряд в структуре SiGe ГБТ с мелко и глубоко щелевой изоляцией

Физические модели в Synopsys Sentaurus позволяют добавлять ловушки в оксиде и на границе Si-SiO<sub>2</sub>, но не включают зависимость скорости рекомбинации от поглощенной дозы гамма-излучения. Поэтому для моделирования характеристик с учетом ионизационных эффектов необходимо добавить в Synopsys Sentaurus DEVICES следующие

щее уравнение для зависимости скорости рекомбинации от поглощенной дозы [13]:

$$S_0 = \sigma \cdot v_{th} \cdot \pi \cdot k_B \cdot T \cdot N_{it}(D_\gamma) \quad (5)$$

где:  $\sigma = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma_n \cdot \sigma_p}$  ;

$S_0$  – скорость рекомбинации;  $\sigma_n, \sigma_p$  – сечение захвата ловушки электрона и дырки соответственно;  $N_{it} = a_{it} \cdot D_\gamma^{b_{it}}$  – концентрация ловушек на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> в зависимости от поглощенной дозы гамма-излучения  $D_\gamma$ ;  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура;  $v_{th}$  – тепловая скорость электрона.

Зависимость скорости рекомбинации от поглощенной дозы была включена в библиотеку Synopsys Sentaurus DEVICES.

Также как и для модели структурных эффектов для моделирования эффекта ионизации необходимо определить поглощенную дозу  $D_\gamma$  после гамма-лучи облучения, эквивалентную поглощенной дозе  $D_p$  после воздействия протонного излучения согласно следующему уравнению:

$$D_p = \delta_{ip}(E) \cdot \Phi_p \quad (6)$$

где  $\delta_{ip}(E)$  - удельная поглощенная доза для протона с определенной энергией (см. рис. 3 [14])

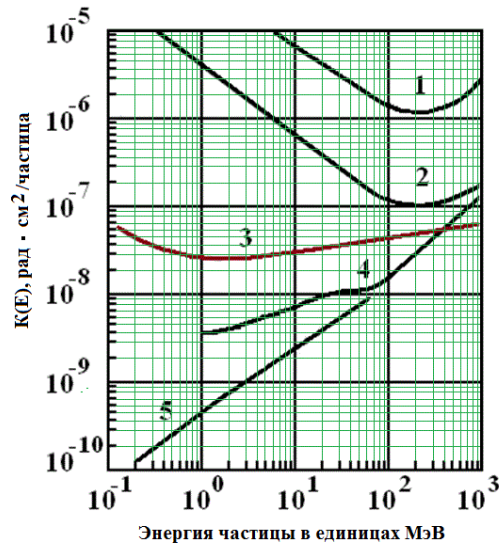


Рис.3. Удельная поглощенная доза в Si для альфа-частиц (1), протонов (2), электронов (3), нейтронов (4) и фотонов (5) с разной энергией [14]

Для исследований на радиационную стойкость при протонном воздействии был выбран SiGe ГБТ, выполненный по 0,18 мкм технологии

SiGe БикМОП 7НР с  $\beta = 250$ ,  $f_T = 120$  ГГц,  $f_{max} = 100$  ГГц. Структура SiGe ГБТ приведена на рис. 4 [15].

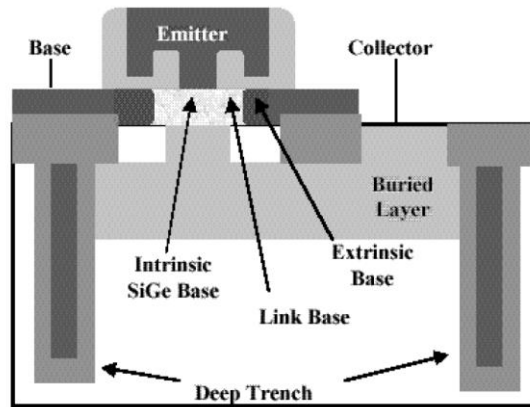


Рис.4. Структура SiGe ГБТ IBM [15]

На первом этапе проводилось моделирование 2D-структуры SiGe ГБТ в Synopsys Sentaurus, а также расчет и сравнение результатов моделирования статических ВАХ для не облученного транзистора с экспериментальными данными. На следующем этапе проводилось сравнение смоделированных и экспериментальных данных после воздействия протонного излучения с разными интегральными потоками ( $1 \cdot 10^{12}$   $1/\text{cm}^2$ ,  $7 \cdot 10^{12}$   $1/\text{cm}^2$ ,  $2 \cdot 10^{13}$   $1/\text{cm}^2$ ,  $5 \cdot 10^{13}$   $1/\text{cm}^2$ ) с энергией 63,3 МэВ [15].

Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования представлены на рис. 5, на которых представлены Гуммель характеристики (а) и коэффициент усиления по току (б) до и после воздействия потока протонов.

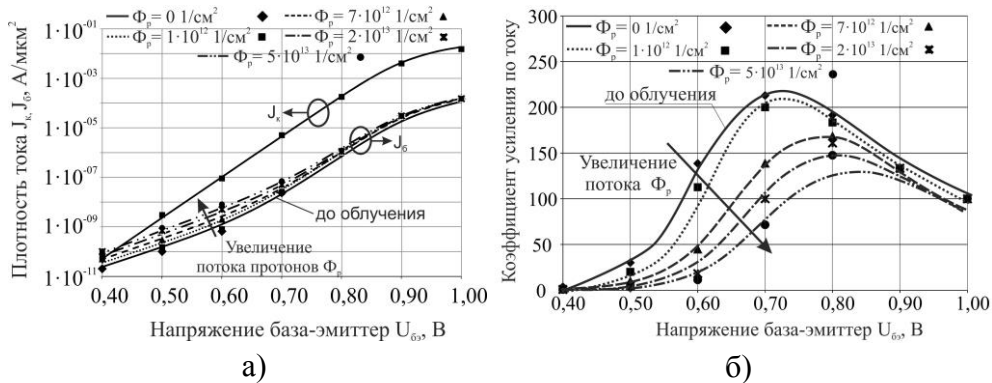


Рис.5. Сравнение смоделированных (линии) и экспериментальных данных (точки) [15] Гуммель характеристик (а) и коэффициенту усиления по току (б) SiGe ГБТ до и после воздействия протонного излучения с интегральными потоками  $1 \cdot 10^{12}$   $1/\text{cm}^2$ ,  $7 \cdot 10^{12}$   $1/\text{cm}^2$ ,  $2 \cdot 10^{13}$   $1/\text{cm}^2$ ,  $5 \cdot 10^{13}$   $1/\text{cm}^2$

Для исследования влияния протонного излучения на характеристики SiGe ГБТ была определена избыточность плотности тока базы  $\Delta J_b$ , которая определяется как разница между плотностями тока базы при напряжении  $U_{be} = 0,7$  В до и после облучения протонами. На рис. 6 показано сравнение экспериментального и смоделированного  $\Delta J_b$ , а также разделенного на ионизационную и структурную составляющую.

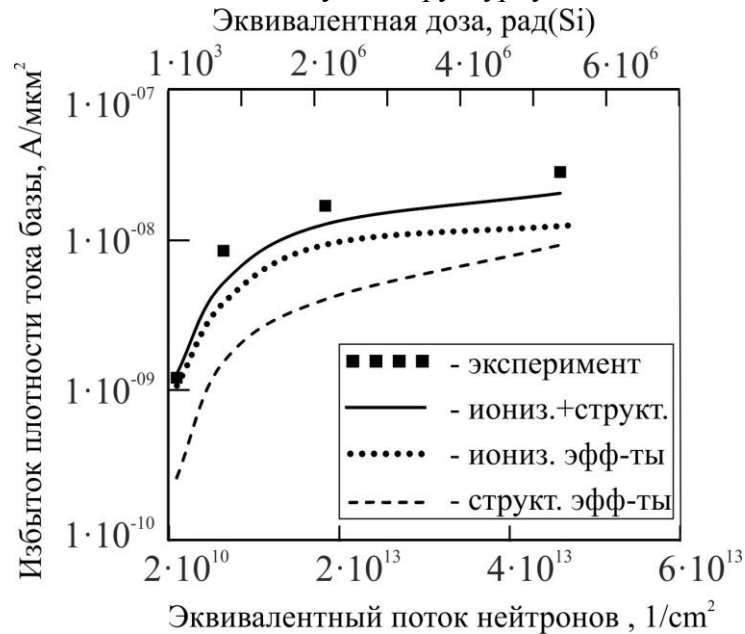


Рис.6. Избыточность плотности тока базы SiGe ГБТ после воздействия протонного излучения

Как видно из рис. 4 увеличение избыточной плотности тока базы после облучения протонами при низких значениях интегрального потока нейтронов в основном зависит от ионизационных эффектов, структурные эффекты вносят соизмеримый с ионизационными эффектами вклад при высоких значениях интегральных протоков протонов с энергией 63,3 МэВ.

Расхождение результатов моделирования и экспериментальных данных составляет не более 10-20%.

В работе была представлена физическая модель для SiGe ГБТ, которая описывает изменение базового тока в результате облучения потоком протонов. Модель основывается на аддитивности влияния ионизационных и структурных эффектов на базовый ток SiGe ГБТ. В Synopsys Sentaurus добавлены аналитические уравнения для электрофизических параметров ( $\tau$ ) и ( $S_0, N_{IT}$ ) с учетом ионизационных и структурных эффектов при воздействии протонного излучения.

Модель была использована для исследования деградации характеристик современного SiGe HBT при воздействии потока протонов. Сравнение смоделированных и экспериментальных характеристик SiGe HBT после облучения протонов с уровнем интегрального потока не более  $2 \cdot 10^{13}$  1/см<sup>2</sup> показывает ошибку 10-20%.

Исследования осуществлены при поддержке грантов РФФИ №14-29-09145 и №15-01-0165.

#### Литература

1. <http://www.synopsys.com/Tools/TCAD/Pages/default.aspx>
2. <http://www.silvaco.com/products/>
3. Akil K. Sutton, John D. Cressler et al., "The Effects of Proton and X-Ray Irradiation on the DC and AC Performance of Complementary (npn + pnp) SiGe HBTs on Thick-Film SOI," IEEE Trans. on Nucl. Sci., vol. 54, No. 6, pp. 2245 – 2250, 2007.
4. Marco Bellini, Bongim Jun, John D. Cressler et al. "X-Ray Irradiation and Bias Effects in Fully-Depleted and Partially-Depleted SiGe HBTs Fabricated on CMOS-Compatible SOI," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 53, No. 6, pp. 3182–3186, 2006.
5. H. J. Barnaby, S. K. Smith, R. D. Schimpf, D. M. Fleetwood, and R. L. Pease, "Analytical model for proton radiations effects in bipolar devices," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 49, pp. 2643–2649, 2002.
6. S. Díez, M. Lozano, G. Pellegrini, F. Campabadal, I. Mandić, D. Knoll, B. Heinemann, and M. Ullán, "Proton Radiation Damage on SiGe:C HBTs and Additivity of Ionization and Displacement Effects," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.56, No.4, pp. 1931 – 1936, 2009.
7. S. Zhang et al., "The effects of proton irradiation on SiGe:C HBTs," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 48, pp. 2233–2237, 2001.
8. A. K. Sutton et al., "A comparison of gamma and proton radiation effects in 200 GHz SiGe HBTs," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 52, pp. 2358–2365, 2005.
9. B. M. Haugerud et al., "Proton and gamma radiation effects in a new first-generation SiGe HBT technology," Solid State Electron., vol. 50, pp. 181–190, 2006.
10. K. Petrosyants, E. Vologdin, M. Kozhukhov et al., "Si BJT and SiGe HBT Performance Modelling after Neutron Radiation Exposure," Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium EWDTs'2011. Kharkov : Kharkov national university of radioelectronics, 2011, pp. 267-270.



11. B. L. Gregory, "Minority carrier recombination in neutron irradiated silicon," IEEE Trans. on Nucl. Sci., vol. NS16, NO. 6, p.p. 53-62, 1969.
12. C. Poivey and G. Hopkinson, "Displacement damage mechanism and effects," in Proc. ESA—EPFL Space Center Workshop 9, Jun. 2009.
13. A.H. Johnston, R.E. Plaag, "Models for total dose degradation of linear integrated circuits," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol 34, pp.1474-1480, 1987.
14. Радиационные эффекты в космосе. Часть 1. Радиация в околоземном космическом пространстве / И.П. Безродных, А.П. Тютнев, В.Т. Семенов. – М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014.-106 с.
15. Marco Van Uffelen and Paul Leroux, J.P. Comeau, A.K. Sutton, B.M. Haugerud, J.D. Cressler, et al., "Proton tolerance of advanced Si-Ge HBTs fabricated on different substrate materials," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.51, No. 6, pp. 3743 – 3747, 2004.