

SPICE-модель для учета влияния эффекта горячих носителей в биполярных транзисторах

М. В. Кожухов, А. Р. Мухаметдинова

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

Аннотация — В статье представлена SPICE-модель кремний-германиевого (SiGe) гетеропереходного биполярного транзистора (ГБТ), позволяющая проводить схемотехническое моделирование устройств с учетом влияния горячих носителей заряда на их электрические характеристики. Представленная SPICE-модель SiGe ГБТ разработана с использованием макромодельного подхода. Ядро представленной макромодели является стандартная SPICE-модель биполярного транзистора (GP, VBIC, NTCUM, MEXTRAM), к которой подключены дополнительные элементы, учитывающие влияние эффектов старения при различных режимах работы транзистора. В работе представлены результаты сравнения измеренных данных и результатов моделирования. Расхождение экспериментальных данных и результатов моделирования составляет не более 5–10% для статических характеристик SiGe ГБТ. Кроме того, разработана и представлена методика экстракции дополнительных параметров SPICE-макромодели, описывающих влияние горячих носителей заряда.

Ключевые слова — SPICE-модели, схемотехническое моделирование, гетеропереходные биполярные транзисторы, старение, горячие носители заряда.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время кремний-германиевые гетеропереходные биполярные транзисторы приобрели популярность в высокочастотной аналоговой и высокоскоростной цифровой аппаратуре из-за их способности работать на высоких частотах до 500 ГГц [1]–[3]. При этом SiGe ГБТ обладают большим коэффициентом усиления по току, низкими уровнями шума, а также высокими надежностными характеристиками. Однако, вопрос надёжности SiGe ГБТ при длительной эксплуатации становится все более серьезной проблемой для разработчиков схем. Это связано с постоянным увеличением рабочих частот аппаратуры, что требует увеличения плотности тока и снижения пробивных напряжений SiGe ГБТ. При этом зачастую современные СВЧ схемы требуют, чтобы SiGe ГБТ работали за пределами области безопасной работы, что в итоге приводит к постепенной деградации основных электрических параметров транзистора, таких как коэффициент усиления по току и коэффициент шума [4], [5]. В связи с тем, что старение транзистора — это достаточно длительный процесс,

поэтому для оценки старения транзисторов разработаны стресс тесты, позволяющие существенно сократить время испытаний. Дegradация параметров и характеристик SiGe ГБТ при таких испытаниях происходит за счет влияния горячих носителей заряда (см. рис. 1) при следующих режимах работы: 1) высокая плотность прямого тока; 2) высокие обратные напряжения коллектор-база; 3) смешанный режим, который имитирует основной режим работы транзистора и характеризуется высокой плотностью прямого тока и высоким напряжением коллектор-база [4]–[7].

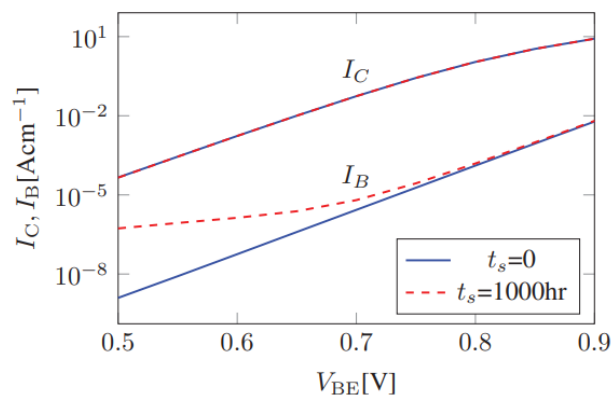


Рис. 1. Характеристика Гуммеля для SiGe ГБТ до и после смешанного режима работы [6]

Механизм влияния горячих носителей заряда при высокой плотности прямого тока эмиттера определяется деградацией оксида между эмиттером и базой [8]–[10]. Кроме того, во время этого механизма происходит взаимодействие горячих носителей заряда со связями Si-H на границе оксид/поликремний, что модулирует дополнительное сопротивление в эмиттерной и пассивных базовых областях транзистора [9], [10].

Механизм влияния обратного напряжения эмиттер-база приводит к разрушению диэлектрика в области эмиттер-база из-за инжекции горячих носителей, получивших энергию под действием высокого напряжения [11].

Механизм влияния смешанного режима происходит при одновременном воздействии высокой плотности прямого тока и высокого напряжения коллектор-база.

При этом напряжение коллектор-база при смешанном режиме индуцирует ловушки не только в области эмиттерного рп-перехода, но и в области коллекторного рп-перехода, что приводит к более существенному увеличению тока базы [12].

В связи с вышеизложенным для создания аппаратуры с длительными сроками эксплуатации требуется учитывать влияние горячих носителей заряда на электрические характеристики SiGe ГБТ. А разработчик при проектировании схем на базе SiGe ГБТ должен использовать их SPICE-модели, учитывающие эффекты старения при разных электрических режимах.

II. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КОМПАКТНЫХ SPICE-МОДЕЛЕЙ SiGe ГБТ, УЧИТЫВАЮЩИХ ЭФФЕКТЫ СТАРЕНИЯ

Для проведения схемотехнического моделирования с учетом влияния эффектов старения на электрические характеристики SiGe ГБТ в настоящее время разработаны несколько SPICE-моделей [10], [14], каждая из которых обладает своими ограничениями.

В статье [14] для описания влияния горячих носителей на параметры биполярного транзистора используется эмпирическая модель надежности. При этом модель учитывает только механизмы деградации транзистора, работающего в прямом и инверсном режимах. Кроме того, модель обеспечивает приемлемое совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными только при больших временах воздействия критичных значений напряжений и токов.

В работе [10] представлена SPICE-модель старения SiGe ГБТ, основанная на реакционно-диффузионной модели. Эта модель с достаточной точностью позволяет прогнозировать влияние эффектов старения на электрические характеристики SiGe ГБТ. Однако, применение данной SPICE-макромодели ограничивается только стандартной моделью NiCuM [13], а определение дополнительных параметров является сложной и трудоемкой задачей, что является существенным недостатком для выполнения схемотехнического моделирования.

Анализ работ по моделированию старения биполярных транзисторов показал, что существующие модели не удобны или недостаточно точны для проведения схемотехнического моделирования аппаратуры.

Поэтому данная работа была направлена на исследование влияния эффектов старения SiGe ГБТ при различных электрических режимах и разработку SPICE-макромодели, позволяющей проводить схемотехническое моделирование с учетом влияния горячих носителей заряда на электрические характеристики SiGe ГБТ при смешанном режиме работы и с использованием различных базовых SPICE-моделей. При этом SPICE-макромодель SiGe ГБТ должна учитывать деградацию статических

электрических характеристик в зависимости от времени стресса и значений рабочих напряжений и токов.

III. SPICE-МАКРОМОДЕЛЬ SiGe ГБТ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ЭФФЕКТА СТАРЕНИЯ

Как отмечалось ранее основным эффектом старения SiGe ГБТ является увеличение тока базы с увеличением времени стресса. При этом ток коллектора остается постоянным и не зависит от режимов и времени стресса. Таким образом, SPICE-модель SiGe ГБТ должна описывать изменение тока базы в зависимости от времени стресса.

SPICE-модель SiGe ГБТ учитывающая эффекты старения базируется на макромодельном подходе, который заключается в добавлении к основному транзистору, описываемому одной из стандартных SPICE-моделей SiGe ГБТ (GP, VBIC, MEXTRAM, NiCuM), дополнительных схемных элементов, учитывающих влияние эффектов старения. Данная модель дополняет унифицированную SPICE-RAD модель для учета радиационных эффектов [15].

Для учета влияния времени стресса и режимов работы на электрические характеристики SiGe ГБТ к стандартной SPICE-модель SiGe ГБТ был добавлен диод с параметрами, зависящими от времени стресса и режимов работы транзистора (см. рис. 1).

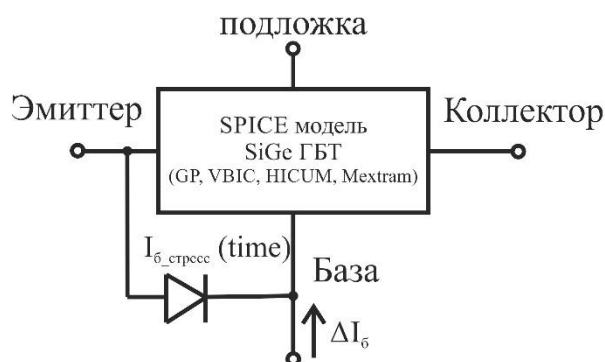


Рис. 2. SPICE-макромодель SiGe ГБТ, учитывающая эффект влияния горячих носителей

Диод $I_{б_стресс}(time)$ позволяет учитывать увеличение тока базы, вызванное влиянием горячих носителей заряда при высоких плотностях прямого тока и напряжениях коллектор-база.

Для проведения схемотехнического моделирования с учетом эффектов старения необходимо задать значения параметров $I_s(time)$ и $N(time)$ диода для требуемого режима работы транзистора. При необходимости зависимость параметра $I_s(time)$ от времени стресса можно аппроксимировать кусочно-линейной или степенной функцией

$$I_s(t) = A * t^B \quad (1)$$

где: A, B – численные коэффициенты, t – время стресса в секундах.

Разработанная SPICE-макромодель использовалась для моделирования BAX SiGe ГБТ, изготовленного по

0,2 мкм BiCMOS технологии с параметрами: пробивное напряжение коллектор-эмиттер 2,5 В и максимальная частота 120 ГГц. Экспериментальные данные [16] были получены в результате смешанного режима стресс теста с плотностью тока эмиттера 40 мА/мкм² и напряжением коллектор-база 3 В.

На рис. 4 приведено сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования 0,2 мкм SiGe ГБТ. Точками на графике показаны экспериментальные данные, и линиями результат моделирования.

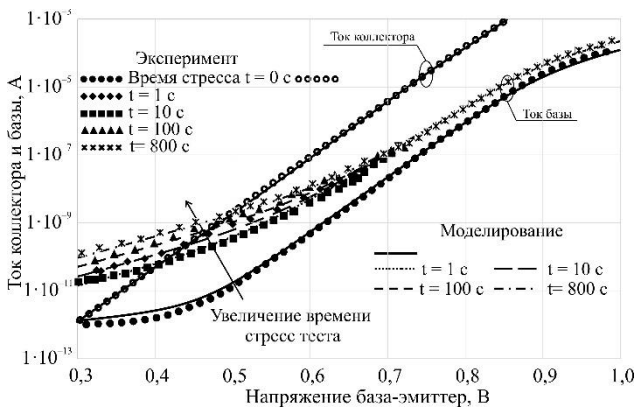


Рис. 4. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных тока базы при различных временах стресса

Представленная SPICE-макромодель применялась для моделирования SiGe ГБТ, изготовленного по 0,55 нм BiCMOS технологии ф. STMicroelectronics [17]. Данный транзистор был подвержен испытаниям на старения в смешанном режиме со следующими параметрами: плотность тока эмиттера 19 мА/мкм², напряжение коллектор-база 1,5 В.

На рис. 5 приведено сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования 0,55 нм SiGe ГБТ ф. STMicroelectronics. Точками на графике показаны экспериментальные данные, и линиями результат моделирования.



Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования тока базы 0,55 нм SiGe ГБТ ф. STMicroelectronics при различных временах стресса

В таблице 1 приведены параметры двух SPICE-моделей SiGe ГБТ, учитывающих влияние эффекта старения.

Таблица 1

Параметры SPICE-модели SiGe ГБТ

0,2 мкм SiGe ГБТ BiCMOS (базовая модель – GP)	0,55 нм SiGe ГБТ BiCMOS STMicroelectronics (базовая модель – GP)
IS = $1,8 \cdot 10^{-17}$ А	IS = $3,0 \cdot 10^{-16}$ А
NF = 1,035	NF = 0,96
BF = 185	BF = 850
ISE = $2,1 \cdot 10^{-14}$ А	ISE = $5,5 \cdot 10^{-13}$ А
NE = 3,9	NE = 6,5
VAF = 345 В	VAF = 275 В
IKF = $8,0 \cdot 10^{-3}$ А	IKF = $5,0 \cdot 10^{-3}$ А
RE = 5,6 Ом	RE = 12,9 Ом
RB = 150 Ом	RB = 150 Ом
RC = 10 Ом	RC = 10 Ом
EG = 0,86 эВ	EG = 0,86 эВ
A = $2,5 \cdot 10^{-13}$ А	A = $1,0 \cdot 10^{-16}$ А
B = 0,14	B = 0,32
N = 2,5	N = 2,4

Как видно из представленных результатов сравнения экспериментальных данных и результатов моделирования (рис. 4 и 5) ошибка моделирования составляет не более 5–10% для испытаний при смешанном режиме с разными плотностями тока и напряжениями коллектор-база.

IV. ПРОЦЕДУРА ЭКСТРАКЦИИ SPICE-МОДЕЛИ КРЕМНИЙ-ГЕРМАНИЕВОВОГО ГЕТЕРОПЕРЕХОДНОГО БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА, УЧИТЫВАЮЩАЯ ЭФФЕКТ СТАРЕНИЯ

Неотъемлемой частью SPICE-модели является методика экстракции дополнительных параметров.

Экстракцию параметров SPICE-модели, учитывающей эффекты старения, можно разделить на несколько этапов:

1. Выбор базовой SPICE-модели SiGe ГБТ
2. Определение параметров базовой SPICE-модели
3. Определение параметров Is и N дополнительного диода для каждого времени стресса для определённого режима работы транзистора
4. Аппроксимация зависимости параметров Is и N дополнительного диода от времени стресса.

Поэтому основной задачей для проведения схемотехнического моделирования устройства на базе SiGe ГБТ с учетом влияния эффекта горячих носителей является определение зависимости параметров Is и N дополнительного диода от времени стресса и получение

численных коэффициентов аппроксимирующей функции. Для этого необходимо определить значение параметров I_s и N для каждого значения времени стресс теста (см. рис. 6).

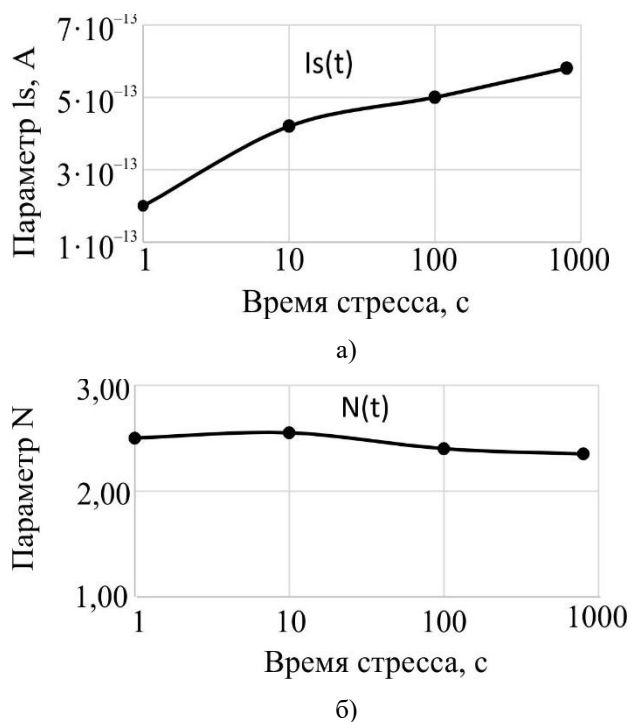


Рис. 6. Зависимость параметров I_s (а) и N (б) дополнительного диода от времени стресса

Далее необходимо аппроксимировать полученную зависимость путем определения численных коэффициентов A и B из (1). При этом для экстракции параметров не требуется проведение дополнительных измерений.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены механизмы, влияющие на деградацию электрических характеристик SiGe ГБТ, обусловленные воздействием горячих носителей заряда на структуру биполярного транзистора.

Предложена компактная SPICE-модель SiGe ГБТ, учитывающая эффект влияния горячих носителей и позволяющая проводить схемотехническое моделирование устройств.

Представлены сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования для двух SiGe ГБТ, выполненных по разным технологиям и испытанных при разных режимах стресс тестов.

SPICE-модель SiGe ГБТ совместима с большинством коммерческих САПР (HSPICE, OrCAD, Eldo, LTSPICE и т. д.) и позволяет учитывать эффекты старения для всех стандартных SPICE-моделей биполярных транзисторов (GP, VBIC, MEXTRAM, HiCuM).

Ошибка моделирования составляет не более 5-10% для статических характеристик SiGe ГБТ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Schroter M., Pawlak A. SiGe heterojunction bipolar transistor technology for sub-mm-wave electronics—State-of-the-art and future prospects //2018 IEEE 18th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF). – IEEE, 2018. – С. 60-63.
- [2] Zandieh A., Schvan P., Voinigescu S. P. Design of a 55-nm SiGe BiCMOS 5-bit time-interleaved flash ADC for 64-Gb/s 16-QAM fiber-optics applications //IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2019. – Т. 54. – №. 9. – С. 2375-2387.
- [3] Wang D. et al. 480-GHz Sensor With Subharmonic Mixer and Integrated Transducer in a 130-nm SiGe BiCMOS Technology //IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2020. – Т. 30. – №. 9. – С. 908-911.
- [4] Moen K. A. et al. Predictive physics-based TCAD modeling of the mixed-mode degradation mechanism in SiGe HBTs //IEEE transactions on electron devices. – 2012. – Т. 59. – №. 11. – С. 2895-2901.
- [5] Chevalier P. et al. Si/SiGe: C and InP/GaAsSb heterojunction bipolar transistors for THz applications //Proceedings of the IEEE. – 2017. – Т. 105. – №. 6. – С. 1035-1050.
- [6] Kamrani H. et al. Physics-based hot-carrier degradation model for SiGe HBTs //2016 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). – IEEE, 2016. – С. 341-344.
- [8] Wier B., Raghunathan U., Chakraborty S., Yasuda H., Menz P., Cressler J. A Comparison of Field and Current-Driven Hot-Carrier Reliability in NPN SiGe HBTs // IEEE Transactions on Electron Devices. 2015. V. 62 №7. С. 2244 – 2250.
- [9] Raghunathan U., Martinez R., Wier B., Omprakash A., Ying H., Bantu T. Hot-Carrier-Damage-Induced Current Gain Enhancement (CGE) Effects in SiGe HBTs // IEEE Transactions on Electron Devices. 2018. V. 65 №6. P. 2430 – 2438.
- [10] Mukherjee C. et al. A unified aging compact model for hot carrier degradation under mixed-mode and reverse EB stress in complementary SiGe HBTs //Solid-State Electronics. – 2020. – Т. 172. – С. 107900.
- [11] Tang D., Hackbarth E., Chen T.-C. On the Very-High-Current Degradations on Si n-p-n Transistors // IEEE Transactions on Electron Devices. 1990. V.37. №7. С. 1698 – 1706.
- [12] Zhang G., Cressler J., Niu G., Joseph A. A New “Mixed-Mode” Base Current Degradation Mechanism In Bipolar Transistors // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. 2002.
- [13] Schroter M., Chakraborty A. Compact hierarchical modeling of bipolar transistors with HICUM //World Scientific, Singapore. – 2010.
- [14] Kim J., Tang J., Dahlstrom M., Green K. Prediction of the Degradation of a Hetero-junction Bipolar Transistor accompanied with Aging Simulation // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. 2015.
- [15] Petrosyants K. O., Kozhukhov M. V. TCAD-SPICE Two Level Simulation of Si BJTs and SiGe HBTs Taking into Account Radiation Effects //Проблемы разработки перспективных микро-и нанoeлектронных систем (МЭС). 2017. №. 4. С. 2-10.
- [16] Zhu C., Liang Q., Al-Huq R., Cressler J. D., Joseph A., Johansen J., Chen T., Niu G., Freeman G., Rieh J., David A. An Investigation of the Damage Mechanisms in Impact Ionization-Induced “Mixed-Mode” Reliability Stressing of Scaled SiGe HBTs // IEEE Electron Devices Meeting. 2004.
- [17] Jaoul M., Ney D., Céli D., Maneux C., Zimmer T. Analysis of a failure mechanism occurring in SiGe HBTs under mixed-mode stress conditions // IEEE 32nd International Conference on Microelectronic Test Structures. 2019.

SPICE-model of SiGe HBT Taking into Account the Aging Effects

M. V. Kozhukhov, A. R. Mukhametdinova

National Research University Higher School of Economics

(Moscow Institute of Electronics and Mathematics), Moscow, Russia, mkozhukhov@hse.ru

Abstract — A SPICE macromodel of the SiGe HBTs taking into account aging effects is presented. It consists of the standard core model selected by the designer and an additional subcircuit taking into account the hot-carrier effects. The macromodel was included into SPICE-like simulators. The advantages of SPICE-model version of SiGeHBT are high accuracy of description for device characteristics, convenience to use for IC designers and simplicity of parameter determination.

Keywords — SPICE, simulation, heterojunction bipolar transistors (HBTs), aging, reliability, hot-carrier degradation.

REFERENCES

- [1] Schroter M., Pawlak A. SiGe heterojunction bipolar transistor technology for sub-mm-wave electronics—State-of-the-art and future prospects //2018 IEEE 18th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF). – IEEE, 2018. – C. 60-63.
- [2] Zandieh A., Schvan P., Voinigescu S. P. Design of a 55-nm SiGe BiCMOS 5-bit time-interleaved flash ADC for 64-Gbd 16-QAM fiberoptics applications //IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2019. – T. 54. – №. 9. – C. 2375-2387.
- [3] Wang D. et al. 480-GHz Sensor With Subharmonic Mixer and Integrated Transducer in a 130-nm SiGe BiCMOS Technology //IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2020. – T. 30. – №. 9. – C. 908-911.
- [4] Moen K. A. et al. Predictive physics-based TCAD modeling of the mixed-mode degradation mechanism in SiGe HBTs //IEEE transactions on electron devices. – 2012. – T. 59. – №. 11. – C. 2895-2901.
- [5] Chevalier P. et al. Si/SiGe: C and InP/GaAsSb heterojunction bipolar transistors for THz applications //Proceedings of the IEEE. – 2017. – T. 105. – №. 6. – C. 1035-1050.
- [6] Kamrani H. et al. Physics-based hot-carrier degradation model for SiGe HBTs //2016 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). – IEEE, 2016. – C. 341-344.
- [8] Wier B., Raghunathan U., Chakraborty S., Yasuda H., Menz P., Cressler J. A Comparison of Field and Current-Driven Hot-Carrier Reliability in NPN SiGe HBTs // IEEE Transactions on Electron Devices. 2015. V. 62 №7. C. 2244 – 2250.
- [9] Raghunathan U., Martinez R., Wier B., Omprakash A., Ying H., Bantu T. Hot-Carrier-Damage-Induced Current Gain Enhancement (CGE) Effects in SiGe HBTs // IEEE Transactions on Electron Devices. 2018. V. 65 №6. P. 2430 – 2438.
- [10] Mukherjee C. et al. A unified aging compact model for hot carrier degradation under mixed-mode and reverse EB stress in complementary SiGe HBTs //Solid-State Electronics. – 2020. – T. 172. – C. 107900.
- [11] Tang D., Hackbarth E., Chen T.-C. On the Very-High-Current Degradations on Si n-p-n Transistors // IEEE Transactions on Electron Devices. 1990. V.37. №7. C. 1698 – 1706.
- [12] Zhang G., Cressler J., Niu G., Joseph A. A New “Mixed-Mode” Base Current Degradation Mechanism In Bipolar Transistors // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. 2002.
- [13] Schroter M., Chakravorty A. Compact hierarchical modeling of bipolar transistors with HICUM //World Scientific, Singapore. – 2010.
- [14] Kim J., Tang J., Dahlstrom M., Green K. Prediction of the Degradation of a Hetero-junction Bipolar Transistor accompanied with Aging Simulation // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. 2015.
- [15] Petrosyants K. O., Kozhukhov M. V. TCAD-SPICE Two Level Simulation of Si BJTs and SiGe HBTs Taking into Account Radiation Effects // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development. 2017. Issue 4. – Pp. 2-10.
- [16] Zhu C., Liang Q, Al-Huq R., Cressler J. D., Joseph A, Johansen J, Chen T., Niu G., Freeman G., Rieh J., David A. An Investigation of the Damage Mechanisms in Impact Ionization-Induced "Mixed-Mode" Reliability Stressing of Scaled SiGe HBTs // IEEE Electron Devices Meeting. 2004.
- [17] Jaoul M., Ney D., Céli D., Maneux C., Zimmer T. Analysis of a failure mechanism occurring in SiGe HBTs under mixed-mode stress conditions // IEEE 32nd International Conference on Microelectronic Test Structures. 2019.