

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 21
2015
№ 12

**20 ЛЕТ
ЖУРНАЛУ**

САПР

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА

МЕТОДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

ОПЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДЫ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

НЕЙРОСЕТИ И
НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ОПТИМИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

ИТ В ОБРАЗОВАНИИ

ГИС

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 21
2015
№ 12

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

УЧРЕДИТЕЛЬ
Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Харламов А. А., Ермоленко Т. В. Нейросетевая среда (нейроморфная ассоциативная память) для преодоления информационной сложности. Поиск смысла в слабоструктурированных массивах информации. Часть II. Обработка информации в гиппокампе. Модель мира 883
- Лелеков С. Г., Лях А. М. Нечеткий вывод в адаптивных таксономических экспертных системах 890
- Дыкин В. С., Мусатов В. Ю., Варезников А. С., Большаков А. А., Сысоев В. В. Применение генетического алгоритма для определения архитектуры нейронной сети для прибора вида "электронный нос" 895

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

- Кухаренко Б. Г., Солнцева-Чалей М. О. Спектральный метод с использованием полярной кривизны для анализа результатов кластеризации многомерных траекторий 901
- Моисеев А. А. Модель продаж стандартными партиями 906

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- Стемпковский А. Л., Тельпухов Д. В., Соловьев Р. А., Рухлов В. С. Тестовая система для сравнения алгоритмов, увеличивающих надежность комбинационных схем 910
- Петросянц К. О., Харитонов И. А., Кожухов М. В., Самбурский Л. М. Схемотехнические SPICE-модели биполярных и МОП-транзисторов для автоматизации проектирования радиационно стойких БИС 916

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Червяков Н. И., Ляхов П. А., Калита Д. И. Выбор оптимального набора модулей системы остаточных классов для повышения производительности фильтров с конечной импульсной характеристикой 923

БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ

- Щеглов К. А., Щеглов А. Ю. Интерпретация и моделирование угрозы атаки на информационную систему. Часть I. Моделирование угрозы уязвимости и интерпретация угрозы атаки 930

Журнал в журнале НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Галушкин А. И. Нейрочипы и нейроморфные ЭВМ: проблемы моделирования 942
- Горбатков С. А., Касимова Л. И. Нейросетевой итерационный метод построения динамических моделей вероятности риска банкротства при неполных данных. 949
- Указатель статей, опубликованных в журнале "Информационные технологии" в 2015 г. 958

Главный редактор:
СТЕМПКОВСКИЙ А. Л.,
акад. РАН, д. т. н., проф.

Зам. главного редактора:
ИВАННИКОВ А. Д., д. т. н., проф.
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с.н.с.

Редакционный совет:
БЫЧКОВ И. В., акад. РАН, д. т. н.
ЖУРАВЛЕВ Ю. И.,
акад. РАН, д. ф.-м. н., проф.
КУЛЕШОВ А. П.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ПОПКОВ Ю. С.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
РУСАКОВ С. Г.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
РЯБОВ Г. Г.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
СОЙФЕР В. А.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
СОКОЛОВ И. А., акад.
РАН, д. т. н., проф.
СУЕТИН Н. В., д. ф.-м. н., проф.
ЧАПЛЫГИН Ю. А.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
ШАХНОВ В. А.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
ШОКИН Ю. И.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ЮСУПОВ Р. М.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

Редакционная коллегия:
АВДОШИН С. М., к. т. н., доц.
АНТОНОВ Б. И.
БАРСКИЙ А. Б., д. т. н., проф.
ВАСЕНИН В. А., д. ф.-м. н., проф.
ВИШНЕКОВ А. В., д. т. н., проф.
ГАЛУШКИН А. И., д. т. н., проф.
ДИМИТРИЕНКО Ю. И., д. ф.-м. н., проф.
ДОМРАЧЕВ В. Г., д. т. н., проф.
ЗАБОРОВСКИЙ В. С., д. т. н., проф.
ЗАГИДУЛЛИН Р. Ш., к. т. н., доц.
ЗАРУБИН В. С., д. т. н., проф.
КАРПЕНКО А. П., д. ф.-м. н., проф.
КОЛИН К. К., д. т. н., проф.
КУЛАГИН В. П., д. т. н., проф.
КУРЕЙЧИК В. М., д. т. н., проф.
КУХАРЕНКО Б. Г., к. ф.-м. н., доц.
ЛЬВОВИЧ Я. Е., д. т. н., проф.
МИХАЙЛОВ Б. М., д. т. н., проф.
НЕЧАЕВ В. В., к. т. н., проф.
ПОЛЕЩУК О. М., д. т. н., проф.
СОКОЛОВ Б. В., д. т. н., проф.
ТИМОНИНА Е. Е., д. т. н., проф.
УСКОВ В. Л., к. т. н. (США)
ФОМИЧЕВ В. А., д. т. н., проф.
ЧЕРМОШЕНЦЕВ С. Ф., д. т. н., проф.
ШИЛОВ В. В., к. т. н., доц.

Редакция:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЛЫСЕНКО А. В.
ЧУГУНОВА А. В.

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://novtex.ru/IT>.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования.

Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

К. О. Петросянц^{1, 2}, д-р техн. наук, проф., И. А. Харитонов¹, канд. техн. наук, проф.,
М. В. Кожухов¹, аспирант, Л. М. Самбурский^{1, 2}, канд. техн. наук, доц., e-mail: kpetrosyants@hse.ru,

¹ Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"

(Московский институт электроники и математики), г. Москва

² Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, г. Москва

Схемотехнические SPICE-модели биполярных и МОП-транзисторов для автоматизации проектирования радиационно стойких БИС

Возможности коммерческих SPICE-симуляторов электронных схем расширены в новую область — расчет схем космической электроники. С этой целью в библиотеки моделей коммерческих версий программы SPICE включен набор моделей биполярных и МОП-транзисторов, учитывающих воздействие различных видов радиации (гамма-лучей, протонов, нейтронов, электронов, одиночных заряженных частиц). Приведены примеры расчета биполярных и МОП-интегральных схем с учетом требований радиационной стойкости.

Ключевые слова: биполярные транзисторы (БТ), гетеропереходные биполярные транзисторы (ГБТ), МОП-транзисторы, ионизирующее излучение, SPICE-модели, системы автоматизированного проектирования (САПР), схемотехническое моделирование, радиационная стойкость

Введение

Современный рынок экстремальной электроники включает в себя приборы, микросхемы и системы на кристалле и в корпусе, которые работают в аппаратуре, подверженной воздействию внешних факторов, в частности радиации. Это спутниковые системы, включенные в глобальную коммуникационную инфраструктуру, космические системы обработки и передачи изображений для климатических, топографических работ, системы обнаружения и исследования элементарных частиц, системы обработки медицинских изображений, системы контроля и управления объектов атомной энергетики, системы вооружения и военной техники и др. Очевидно, что этот рынок в будущем будет только расширяться.

В большинстве случаев обычные электронные приборы, используемые в составе экстремальных систем, быстро деградируют и выходят из строя в результате воздействия радиационного излучения. Поэтому к надежности электронной компонентной базы предъявляются чрезвычайно высокие требования, которые обеспечиваются за счет использования особо надежных конструктивно-технологических решений, специальных средств защиты и специальных, более "жестких" методов проектирования приборов и схем с повышенной надежностью. С этой целью разработчиками используются системы радиационно стойкого проектирования "hardening-by-design".

Коммерческие программы, построенные на базе платформы SPICE, широко используются в системах автоматизированного схемотехнического проектирования [1–4]. Однако возможности этих программ при проектировании схем, работающих в экстремальных условиях эксплуатации, существ-

венно ограничены, поскольку заложенные в них модели не учитывают различные виды внешних воздействий: радиацию, температуру, электромагнитное излучение и др.

В настоящей работе сделана попытка снять существующие ограничения в части учета радиационных эффектов. Предложен набор компактных схемотехнических моделей биполярных и МОП-транзисторов, учитывающих различные виды радиационных воздействий. Модели встроены в библиотеки моделей коммерческих SPICE-подобных программ, что позволило распространить возможности этих программ на задачи проектирования радиационно стойких интегральных схем (ИС), удовлетворяющих жестким требованиям по показателям надежности, сбоеустойчивости и срока службы в составе бортовой аппаратуры.

1. Методология разработки SPICE-моделей компонентов, учитывающих радиационные эффекты

Анализ отечественных и зарубежных работ по созданию SPICE-моделей биполярных транзисторов (БТ) и МОП-транзисторов (МОПТ), учитывающих радиационные эффекты [5–10], показал, что существующие модели, во-первых, узкоспециализированы и направлены на решение частных задач, во-вторых, учитывают, как правило, только один вид радиационного воздействия, в-третьих, эквивалентные схемы и уравнения, вводимые для учета радиационных эффектов, отличаются большим разнообразием и содержат большое число формальных коэффициентов, которые или трудно определяются из результатов традиционных измерений, или требуют специальных дополнительных измерений. Для работы с такими моделями, как правило,

требуется специальная подготовка пользователя, кроме того, большое разнообразие частных моделей со своим математическим описанием, системой параметров и специфической методикой экстракции параметров создает серьезные трудности при включении этих моделей в библиотеки моделей коммерческих или промышленных версий программ-модельных схемотехнического проектирования SPICE.

В настоящей работе перечисленные выше проблемы решены за счет создания одной унифицированной модели для всех разновидностей БТ и унифицированной модели для разновидностей МОПТ. При этом каждая унифицированная модель для БТ и для МОПТ учитывает влияние радиационных эффектов всех видов: нейтронов, протонов, электронов, гамма-квантов, импульсного излучения и одиночных заряженных частиц (ОЯЧ). Каждая унифицированная модель состоит из центрального ядра, которое включает в себя существующие стандартные SPICE-модели БТ или МОПТ, и дополнительной электрической подсхемы (отдельно для БТ и отдельно для МОПТ), учитывающей все виды радиационного воздействия и подключаемой к центральному ядру. Дополнительные подсхемы состоят из стандартных элементов электрических цепей, параметры этих элементов определяются по стандартным методикам измерений характеристик на тестовых приборах, доступным и понятным разработчикам ИС. Такая организация моделей резко упрощает процесс схемотехнического проектирования ИС с учетом радиационных эффектов.

Основные этапы разработки SPICE-моделей электронной компонентной базы (ЭКБ) с учетом радиационных эффектов представлены на рис. 1. Для создания моделей используется комбинация двух универсальных методов: 1) макромодельный подход, заключающийся в подключении схемных элементов к стандартной SPICE-модели полупроводникового прибора; 2) введение в уравнения схе-



Рис. 1. Схема стратегии разработки SPICE-моделей компонентов с учетом радиационных эффектов

мотехнической модели дополнительных математических выражений для описания радиационно-зависимых параметров.

Для космической электроники наиболее важны следующие виды радиационного воздействия: полная поглощенная доза гамма-излучения, протоны, нейтроны, электроны, одиночные частицы. Физические эффекты, вызванные воздействием этих видов, включаются в стандартные модели биполярных и МОП-транзисторов, изготовленных по различным технологиям: обычные Si БТ, GaAs гетеропереходные биполярные транзисторы (ГБТ), SiGe ГБТ, обычные МОПТ, МОПТ со структурой "кремний на изоляторе/сапфире" (КНИ/КНС), МОП-транзисторы с двойной диффузией (ДМОПТ), полевые транзисторы с управляющим *p-n*-переходом (JFET), MESFET и HEMT на основе GaAs и др.

Все перечисленные выше разновидности биполярных и МОП-транзисторов, изготовленные на основе кремний-германия (SiGe) и арсенида галлия (GaAs), обладают повышенными показателями по радиационной стойкости. По оценкам специалистов Американского космического агентства NASA, Европейского космического агентства, Роскосмоса и Росатома, они включены в список перспективных компонентов для производства радиационно стойких схем для космической и другой специальной аппаратуры [16, 17].

2. Унифицированная SPICE-модель биполярного транзистора с учетом радиационных эффектов

При выборе полупроводникового прибора для использования в электронной аппаратуре специальным назначением необходимым этапом является оценка воздействия различных видов радиации на степень деградации его электрических параметров.

В качестве примера на рис. 2 для биполярного *n-p-n*-транзистора интегральной схемы операции

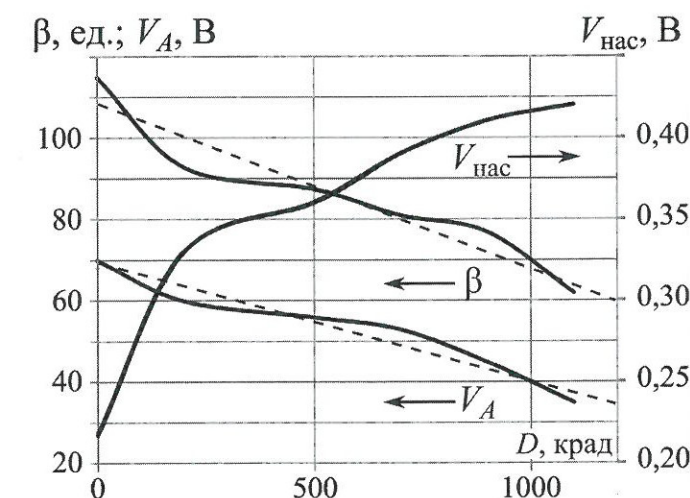


Рис. 2. Зависимости напряжения Эрли V_A , напряжения насыщения $V_{нас}$ и коэффициента усиления по току β от поглощенной дозы D электронного излучения для интегрального биполярного *n-p-n*-транзистора

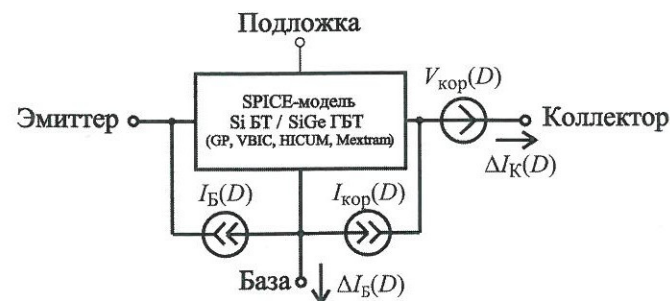


Рис. 3. Компактная SPICE-модель биполярного транзистора, учитывающая радиационные эффекты

ного усилителя [18] приведены зависимости основных параметров: напряжения Эрли V_A , напряжения насыщения $V_{нас}$ и коэффициента усиления по току β от поглощенной дозы электронного излучения.

Видно, что все важные для БТ параметры β , V_A , $V_{нас}$ существенным образом деградируют.

Для каждого вида облучения деградация характеристик БТ должна с достаточной точностью описываться его SPICE-моделью.

В нашем случае при использовании макромодельного подхода транзистор описывается одной из известных стандартных SPICE-моделей БТ. Эта модель является ядром, к которому подключена под-схема, содержащая дополнительные схемные элементы, учитывающие влияние разных видов радиационных излучений (рис. 3).

В макромодели для учета влияния воздействия разных видов статических излучений (нейтроны, протоны, электроны, гамма- и рентгеновские лучи и др.) используются следующие схемные элементы: источник радиационно-индуцированного тока базы $I_B(D)$, описывающий спад усиления в области малых токов после облучения; источник тока $I_{KOP}(D)$,

учитывающий уменьшение тока насыщения коллектора после полученной дозы D ; источник напряжения $V_{KOP}(D)$, учитывающий эффект увеличения напряжения $V_{нас}$ в результате облучения.

Дополнительные схемные элементы SPICE макромодели Si БТ или SiGe ГБТ для учета влияния различных видов радиации описываются следующими уравнениями [5, 19]:

$$I_B(D) = I_{sd}(1 + K_d D) \left(\exp \left[\frac{U_{БЭ}}{n_{ed}} \right] - 1 \right) + I_{ss \max} (1 - \exp[-K_s D]) \left(\exp \left[\frac{U_{БЭ}}{n_{es}} \right] - 1 \right); \quad (1)$$

$$I_{KOP}(D) = I_d(D) \exp \left[\frac{U_{КЭ}}{n_{es}} \right]; \quad I_d(D) = v + g \exp[-hD]; \quad (2)$$

$$V_{KOP}(D) = \sqrt{CD} \left(1 - \exp \left[\frac{U_{КЭ} B}{n_{es}} \right] \right) = \sqrt{\frac{aD}{1 + f \exp S}} \left(1 - \exp \left[\frac{U_{КЭ} B}{n_{es}} \right] \right), \quad (3)$$

где I_{sd} , $I_{ss \max}$, K_d , K_s , n_{ed} , n_{es} , v , g , h , a , f , S , B — подгоночные коэффициенты; D — поглощенная доза излучения или поток частиц; $U_{БЭ}$ — напряжение база-эмиттер, $U_{КЭ}$ — напряжение коллектор-эмиттер.

Уравнения (1)–(3) являются общими для всех видов радиации. Для протонов, электронов, гамма- и рентгеновских лучей в качестве влияющего фактора используется доза D ; для учета влияния нейтронного излучения необходимо в уравнениях (1)–(3) заменить дозу D на значения интегрального потока нейтронов Φ .

Разработанная макромодель в отличие от других известных моделей [5–7] обладает большей гибко-

стью при описании изменения тока базы, что позволяет описывать зависимости любой сложности с приемлемой точностью. Также разработанная макромодель учитывает изменение напряжения насыщения и напряжения пробоя на выходных характеристиках после воздействия радиации. В аналогичных работах учет влияния различных видов проникающей радиации на выходные характеристики либо учитывается частично, либо не учитывается совсем.

Ниже приведены примеры использования разработанной SPICE-макромодели для расчета параметров Si БТ и SiGe ГБТ, подвергнутых воздействию нейтронного, протонного, электронного и гамма-излучений. Для моделирования были выбраны транзисторы:

- интегральный n - p - n Si БТ, изготовленный по отечественной технологии аналоговых ИС с параметрами: коэффициент усиления по току $\beta = 70$, граничная частота $f_{гр} = 5,1$ ГГц и максимальная частота $f_{max} = 1,9$ ГГц;
- SiGe ГБТ компании IBM, выполненный по технологии 8HP с проектной нормой 120 нм с параметрами: $\beta = 450$, $f_{гр} = 200$ ГГц, $f_{max} = 100$ ГГц;
- SiGe ГБТ компании IBM, выполненный по технологии 9T с проектной нормой 120 нм с параметрами: $\beta = 1250$, $f_{гр} = 350$ ГГц, $f_{max} = 250$ ГГц.

На рис. 4 приведены результаты измерения и моделирования с помощью разработанной модели коэффициента усиления вышеупомянутых транзисторов до и после воздействия различных видов радиации. Расхождения между измеренными и смоделированными характеристиками Si БТ и SiGe ГБТ не превышают 10–15 %, что является удовлетворительным для прогнозирования параметров и характеристик БТ, подвергнутых воздействию радиации.

Пример использования модели БТ для схемотехнического моделирования приведен на рис. 5, где для различных уровней потока нейтронов показаны результаты измерения и моделирования АЧХ (относительного изменения коэффициента усиления по напряжению K_u) и переходной характеристики выходного напряжения операционного усилителя, реализованного на базе биполярного базового матричного кристалла (БМК) KB1451HN2-4. Погрешность моделирования электрических характеристик облученных схем с помощью макромодели Si БТ/SiGe ГБТ не превышает 25 %, что является удовлетворительным для практики показателем при моделировании динамических характеристик.

3. Унифицированная SPICE-модель МОП-транзистора с учетом радиационных эффектов

Модель рассмотрим на примере КМОП-транзисторов со структурой "кремний на изоляторе/сапфире" (КНИ/КНС КМОПТ), которые обладают повышенной радиационной стойкостью и являются перспективными электронными компонентами для проектирования радиационно стойких ИС.

Разработаны две макромодели BSIMSOI-RAD [14, 20, 21] и EKV-RAD [22, 23] для описания субмикронных КНИ/КНС КМОП-транзисторов с учетом эффектов, возникающих при воздействии статического и импульсного радиационного потока, отдельных ядерных частиц (ОЯЧ). Эквивалентные схемы макромодели BSIMSOI-RAD и EKV-RAD представлены на рис. 6.

Основной элемент макромодели — верхний транзистор $M_{верх}$ (описывается стандартной моделью BSIMSOI v3.2 или EKV v2.64 с радиационно-зависимыми параметрами, см. рис. 6, а) — отражает по-

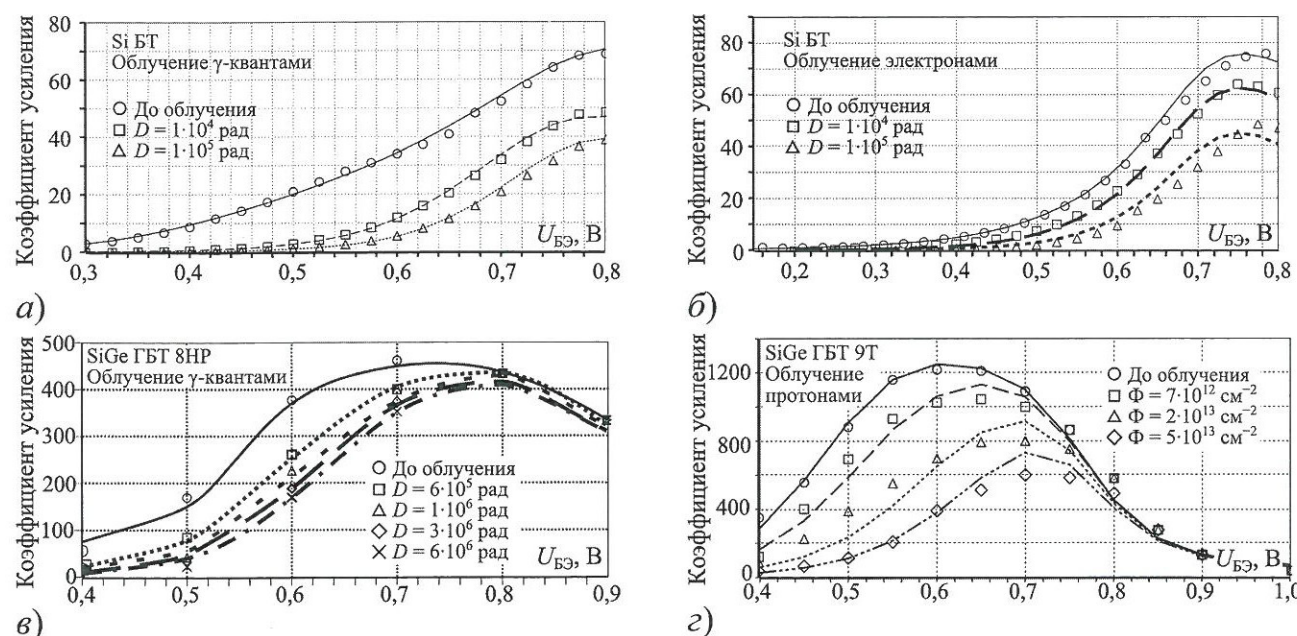


Рис. 4. Сравнение смоделированного и измеренного коэффициента усиления биполярных транзисторов до и после облучения: а — Si БТ, γ -излучение; б — Si БТ, электроны; в — SiGe ГБТ 8HP, γ -излучение; г — SiGe ГБТ 9T, протоны

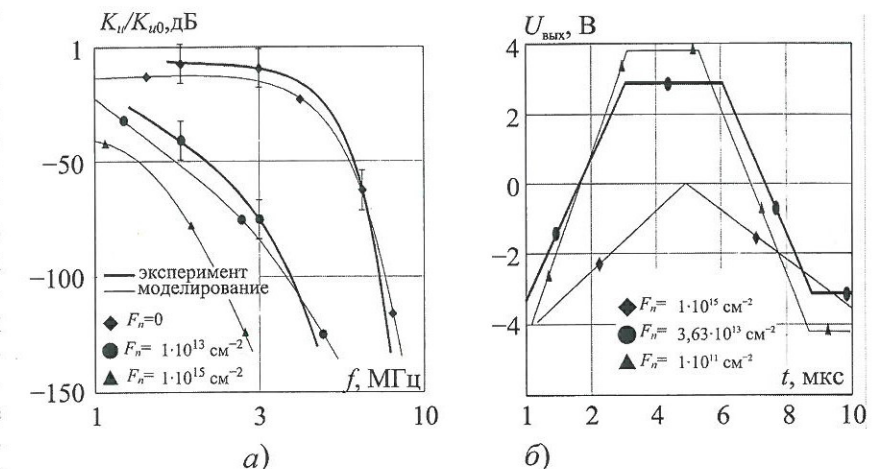


Рис. 5. Сравнение моделированной и измеренной АЧХ (а) и переходной характеристики (б) операционного усилителя для разных значений потока нейтронов F_n

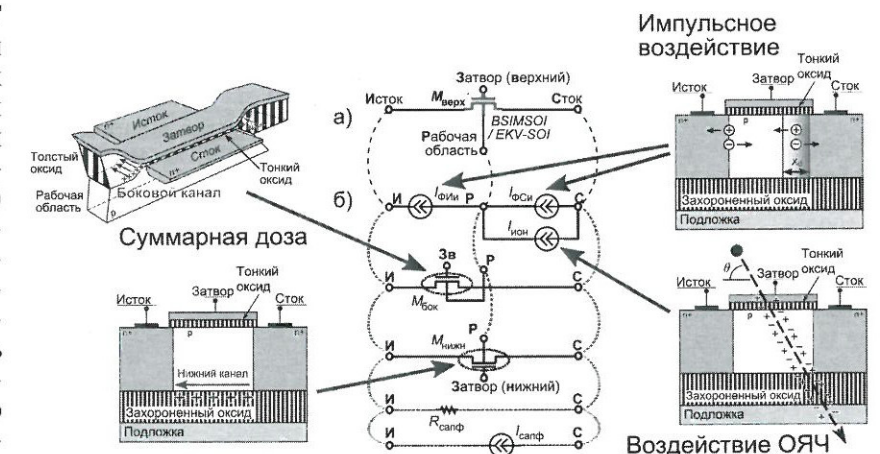


Рис. 6. Эквивалентная схема обобщенной макромодели BSIMSOI-RAD и EKV-RAD для КНИ/КНС МОПТ: а — базовый МОПТ $M_{верх}$ с радиационно-зависимыми параметрами; б — подсхема для учета статических и динамических токов утечки

ведение верхнего МОП-интерфейса. Для учета токов утечки, возникающих при стационарном радиационном воздействии, модель дополняется паразитными нижним $M_{\text{нижн}}$ и боковым $M_{\text{бок}}$ транзисторами; при импульсном воздействии — источниками фототока стокового и истокового $p-n$ -переходов $I_{\text{ФСИ}}(t)$ и $I_{\text{ФИИ}}(t)$ и сопротивлением сапфира $R_{\text{сапф}}(t)$; при воздействии ОЯЧ — источником тока $I_{\text{ион}}(t)$ (см. рис. 6, б).

Базовый элемент макромодели EKV-RAD — стандартная модель EKV [25] — была изначально разработана для описания МОПТ на объемном кремнии. Эта модель распространена на случай МОПТ с диэлектрической КНИ/КНС-подложкой.

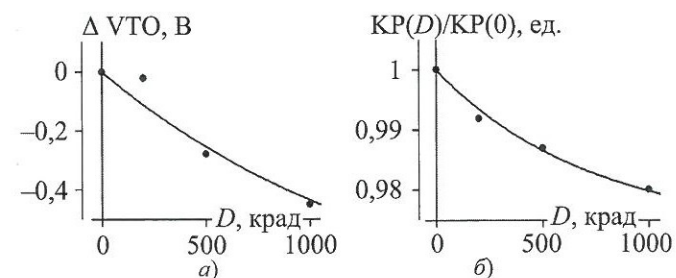


Рис. 7. Типовой вид аппроксимирующих функций для зависимости параметров модели от дозы: а — для пороговых напряжений; б — для подвижности

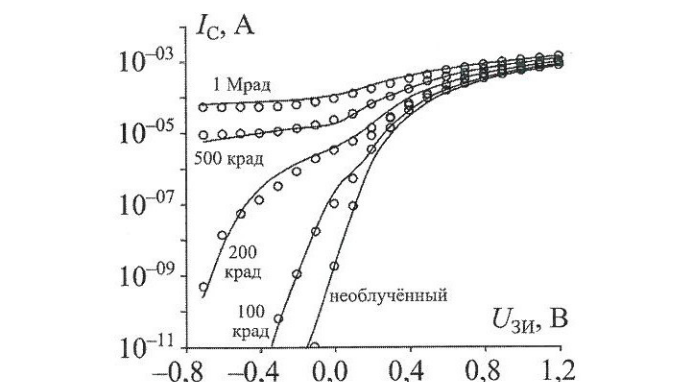


Рис. 8. Измеренные (символы) и смоделированные (линии) сток-затворные ВАХ КНИ МОПТ с размерами затвора $W/L = 8/0,13$ мкм до и после γ -облучения с дозой до 1 Мрад, I_C — ток стока, $U_{зи}$ — напряжение затвор-исток

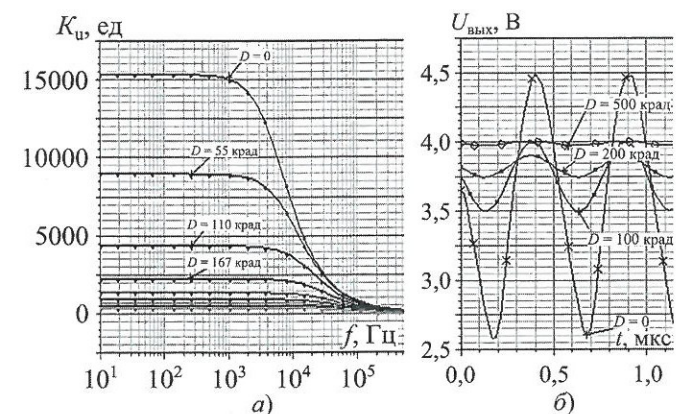


Рис. 9. Результаты моделирования частотных (а) и переходных (б) характеристик операционного усилителя до и после γ -облучения с дозой до 1 Мрад

При воздействии стационарного излучения параметры модели основного верхнего транзистора $M_{\text{верх}}$ и остальных элементов меняются с увеличением дозы излучения. Зависимыми параметрами верхнего и паразитных транзисторов являются пороговое напряжение с коэффициентами (V_{TH0} , V_{TO} и др.), крутизна с коэффициентами (U_0 , U_0 , K_P , E_0 , U_A и др.), предпороговый наклон с коэффициентами (C_{IT} , $GAMMA$ и др.). Типичный вид дозовой зависимости параметров приведен на рис. 7. Радиационные изменения вышеперечисленных параметров, в том числе приведенных на рис. 7, описываются выражениями вида

$$a_{1i}(1 - \exp[-a_{2i}D]), i = 1, \dots, N, \quad (4)$$

где a_1 , a_2 — подгоночные коэффициенты, которые составляют набор радиационных параметров макромодели; N — число радиационно-зависимых параметров.

На рис. 8 для примера приведено сравнение результатов измерения и моделирования сток-затворных ВАХ КНИ МОПТ с размерами затвора $W/L = 8/0,13$ мкм. Погрешность совпадения 10...15 % во всем диапазоне изменения дозы и управляющих напряжений.

В качестве примера использования разработанных моделей КНИ/КНС МОПТ в схемотехнике БИС приведены результаты моделирования АЧХ (коэффициент усиления по напряжению K_u) и переходной характеристики выходного напряжения интегрального ОУ с полным размахом входного напряжения ("rail-to-rail"), содержащего 45 КНИ МОП-транзисторов, изготовленного по отечественной технологии, с учетом поглощенной дозы гамма-излучения в диапазоне 0...1 Мрад (рис. 9).

В качестве примера расчета фрагмента цифровой БИС на рис. 10, а приведены результаты моделирования ячейки памяти статического ОЗУ с учетом попадания тяжелого иона в транзистор M_1 ячейки в момент времени $t = 2,5$ мкс (этап хранения). Рассчитывались два случая с различной энергией воздействующего иона, выраженной параметром ЛПЭ¹: 1) ЛПЭ иона 18 МэВ·см²/мг (без сбоя, см. рис. 10, б, з); 2) ЛПЭ иона 21 МэВ·см²/мг (со сбоем, рис. 10, в). Сбой ячейки зависит от величины заряда, накопленного в пораженном транзисторе. Результаты моделирования корректно отражают поведение ячейки, что дает возможность оценить ее сбоеустойчивость.

Заключение

Разработана библиотека SPICE-моделей биполярных и МОП-транзисторов, изготовленных по перспективным микроэлектронным технологиям, с учетом воздействия радиационных эффектов раз-

¹ ЛПЭ, линейная передача энергии, — это отношение количества энергии, теряемого ионизирующей частицей вследствие столкновений при пролете сквозь вещество, к длине пройденного пути и плотности вещества.

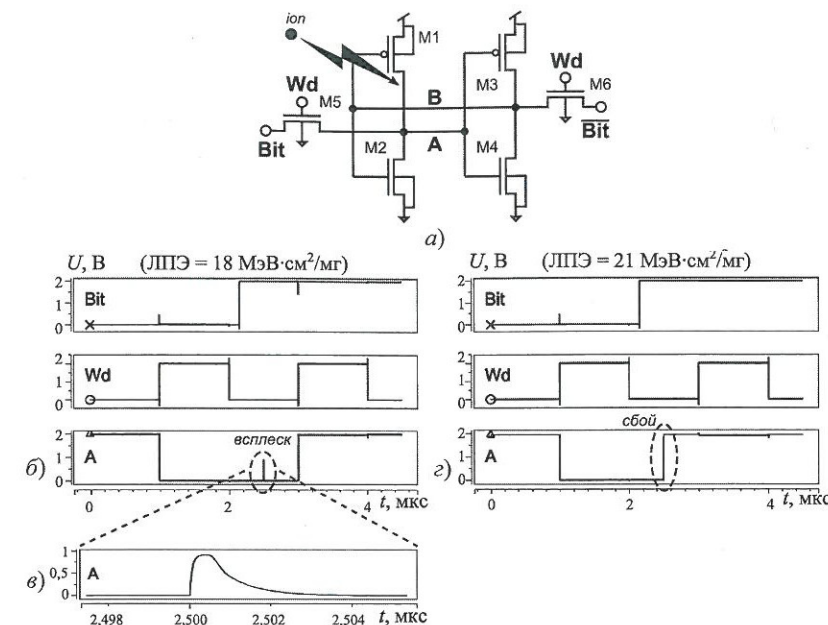


Рис. 10. Результаты моделирования КМОП-ячейки памяти (а) при воздействии ОЯЧ на транзистор МРА: б — без сбоя; в — скачок напряжения $V(A)$ для случая б; з — со сбоем

личного типа (гамма-лучей, протонов, нейтронов, электронов, одиночных частиц). Библиотека включена в коммерческие версии программы SPICE [1—4] и использовалась в работах по схемотехническому проектированию аналоговых и цифровых ИС и БИС, разрабатываемых отечественной промышленностью, в частности, для аналоговых узлов КНС КМОП ИС с повышенной радиационной стойкостью [22—26], биполярных схем операционных усилителей для приемников и передатчиков систем связи [18], КНИ КМОП БИС, построенных на базе семейства радиационно стойких цифроаналоговых БМК, для микромеханических систем [24] и др.

Таким образом, возможности коммерческих версий программы SPICE расширены в новую область — расчет схем космической и другой специальной электроники.

Статья подготовлена в ходе проведения исследования № 15-01-0165 в рамках Программы "Научный фонд Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики" (НИУ ВШЭ)" в 2015 г. и гранта РФФИ № 14-29-09145.

Список литературы

1. Spectre Circuit Simulator, 2013 Cadence Design Systems, Inc.
2. Using SystemVision. Software version 5.7, December 2010, Mentor Graphics Corp.
3. HSPICE, The Gold Standard for Accurate Circuit Simulation, 2010 Synopsys, Inc.
4. SmartSpice, Release Notes, Silvaco Inc. 2014.
5. Van Uffelen M., Geboers S., Leroux P., Berghmans F. SPICE Modeling of a Discrete COTS SiGe HBT for Digital Applications up to MGy Dose Levels // IEEE Trans. on Nuclear Science. 2006. Vol. 53, N. 4. P. 1945—1949.
6. Leroux P., De Cock W., Van Uffelen M., Steyaert M. Modeling, Design, Assessment of 0,4 μm SiGe Bipolar VCSEL Driver IC Under γ -Radiation // IEEE Trans. on Nuclear Science. 2009. Vol. 56, N. 4. P. 1920—1925.

7. Deng Y., Fjeldly T., Ytterdal T., Shur M. S. SPICE modeling of neutron displacement damage and annealing effects in bipolar junction transistors // IEEE Trans. on Electron Devices. 2003. Vol. 50, N. 6. P. 1873—1877.

8. Gorbunov M. S., Danilov I. A., Zebrev G. I., Osipenko P. N. Verilog-A Modeling of Radiation-Induced Mismatch Enhancement // IEEE Trans. on Nuclear Science. 2011. Vol. 58, N. 3. P. 785—792.

9. Alvarado J., Boufouss E., Kilchyska V., Handre D. Compact model for single event transients and total dose effects at high temperatures for partially depleted SOI MOSFETs // Microelectronics Reliability. 2010. Vol. 50. P. 1852—1856.

10. Bu Jianhui, Bi Jinshun, Liu Mengxin, Han Zhengsheng. A total dose radiation model for deep sub-micron PDSOI NMOS // Journal of Semiconductors. 2011. Vol. 32, N. 1. P. 014002-1—014002-3.

11. Petrosyants K., Kozhukhov M. SPICE Model Parameters Extraction Taking into Account the Ionizing Radiation Effects // Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS). 2013. P. 304—307.

12. Petrosyants K. O., Kozhukhov M. V. SiGe HBT Performance Modeling after Proton Radiation Exposure // Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS). 2012. P. 274—277.

13. Petrosyants K. O., Vologdin E. N., Kozhukhov M. V. Si BJT and SiGe HBT Performance Modelling after Neutron Radiation Exposure // Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS). 2011. P. 267—270.

14. Petrosyants K. O., Sambursky L. M., Kharitonov I. A., Yatmanov A. P. SOI/SOS MOSFET compact macromodel taking into account radiation effects // Russian Microelectronics. 2011. Vol. 40, Is. 7. P. 457—462.

15. Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Popov D. A. Coupled TCAD-SPICE simulation of parasitic BJT effect on SOI CMOS SRAM SEU // Proc. of IEEE Last-West Design and Test Symposium (EWDTS). 2013. P. 312—315.

16. Label K., Barth J. An Insider's Guide to Designing Spacecraft Systems and Instruments for Operation in the Natural Space Radiation Environment // Proc. of GSFC Systems Engineering Seminar, 2001. P. 562.

17. Данилин Н., Шипилов К. Особенности применения новой электронно-компонентной базы в космических разработках // Вестник электроники. 2012. № 2 (40). С. 42—45.

18. Прокопенко Н. Н., Будяков А. С., Савченко Е. М. Операционные усилители с обобщенной токовой обратной связью // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем — 2008. Сборник научных трудов / Под общ. ред. А. Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2008. С. 330—333.

19. Petrosjanc K. O., Kharitonov I. A. VLSI device parameters extraction for radiation hardness modeling with SPICE // Proc. of IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures. 1993. P. 9—14.

20. Petrosjanc K. O., Sambursky L. M., Kharitonov I. A. A Compact SOI/SOS MOSFET Macromodel Accounting for Radiation Effects // Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS). 2007. P. 360—364.

21. Petrosjanc K. O., Kharitonov I. A., Orekhov E. V., Sambursky L. M., Yatmanov A. P. Simulation of Radiation Effects in SOI CMOS Circuits with BSIM-SOI-RAD macromodel // Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS). 2009. P. 243—246.

22. Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Sambursky L. M., Bogatyrev V. N., Povarnitsyna Z. M., Drozdenco E. S. Simulation of total dose influence on analog-digital SOI/SOS CMOS circuits with EKV-RAD macromodel // Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS). 2012. P. 60—65.

23. Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Sambursky L. M. Hardware-Software Subsystem for MOSFETs Characteristic Measurement and Parameter Extraction with Account for Radiation Effects // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 718—720. P. 750—755.

24. Petrosjanc K. O., Adonin A. S., Kharitonov I. A., Sicheva M. V. SOI device parameter investigation and extraction for VLSI radiation hardness modeling with SPICE // Proc. of IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures. 1994. P. 126—129.

25. Enz C. C., Krummenacher P., Vittoz E. A. An analytical MOS transistor model valid in all regions of operation and dedicated to low-voltage and low-current applications // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 1995. Vol. 8, N. 1. P. 83—114.

26. Петросьянц К. О., Богатырев В. Н., Гоманилова Н. Б., Поварниченко З. М., Щекин А. А., Харитонов И. А., Самбурский Л. М. Проектирование радиационно-стойкого прецизионного усилителя на базе КНС КМОП технологии // Сб. науч. тр. "Электроника, микро- и нанoeлектроника" / Под ред. В. Я. Стенина. М.: МИФИ, 2013. С. 196–202.

27. Петросьянц К. О., Харитонов И. А., Самбурский Л. М., Орехов Е. В., Чёрный А. И., Поварниченко З. М., Богатырев В. Н., Прокофьев Г. В. Исследование характеристик элементной базы аналоговых КНС КМОП схем, изготовленных по технологии XFAV, с учетом суммарной поглощенной дозы // Сб. науч. тр. "Электроника, микро- и нанoeлектроника" / Под ред. В. Я. Стенина. М.: МИФИ, 2009. С. 57–66.

K. O. Petrosyants, Professor, I. A. Kharitonov, Professor,
M. V. Kozhukhov, Graduate Student, L. M. Sambursky, Associate Professor, e-mail: kpetrosyants@hse.ru

Compact SPICE Models of Bipolar Transistors and MOSFETs for Automation of Radiation-Hardened VLSIs Design

Possibilities of commercial SPICE simulators of integrated circuits are expanded into a new field: design of ICs for space electronics. For this purpose, model libraries of commercial SPICE versions are supplemented with a set of models of bipolar transistors and MOSFETs accounting for radiation influence of various types (gamma rays, protons, neutrons, electrons, single nuclear particles). Examples of bipolar and CMOS ICs design are presented with due account for radiation hardness.

Keywords: bipolar transistors, heterojunction bipolar transistors, MOSFETs, ionizing radiation, SPICE models, computer-aided design, circuit design, radiation hardness

References

1. Spectre Circuit Simulator, 2013 Cadence Design Systems, Inc.
2. Using SystemVision. Software version 5.7, December 2010, Mentor Graphics Corp.
3. HSPICE, The Gold Standard for Accurate Circuit Simulation, 2010 Synopsys, Inc.
4. SmartSpice, Release Notes, Silvaco Inc. 2014.
5. Van Uffelen M., Geboers S., Leroux P., Berghmans F. SPICE Modeling of a Discrete COTS SiGe IIB T for Digital Applications up to MGy Dose Levels, *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 2006, vol. 53, no. 4, pp. 1945–1949.
6. Leroux P., De Cock W., Van Uffelen M., Steyaert M. Modeling, Design, Assessment of 0.4 μm SiGe Bipolar VCSEL Driver IC Under γ -Radiation, *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 2009, vol. 56, no. 4, pp. 1920–1925.
7. Deng Y., Fjeldly T., Ytterdal T., Shur M. S. SPICE modeling of neutron displacement damage and annealing effects in bipolar junction transistors, *IEEE Trans. on Electron Devices*, 2003, vol. 50, no. 6, pp. 1873–1877.
8. Gorbunov M. S., Danilov I. A., Zebrev G. I., Osipenko P. N. Verilog-A Modeling of Radiation-Induced Mismatch Enhancement, *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 2011, vol. 58, no. 3, pp. 785–792.
9. Alvarado J., Boufouss E., Kilchyska V., Flandre D. Compact model for single event transients and total dose effects at high temperatures for partially depleted SOI MOSFETs, *Microelectronics Reliability*, 2010, vol. 50, pp. 1852–1856.
10. Bu Jianhui, Bi Jinshun, Liu Mengxin, Han Zhengsheng. A total dose radiation model for deep submicron PDSOI NMOS, *Journal of Semiconductors*, 2011, vol. 32, no. 1, pp. 014002-1–014002-3.
11. Petrosyants K., Kozhukhov M. SPICE Model Parameters Extraction Taking into Account the Ionizing Radiation Effects, *Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS)*, 2013, pp. 304–307.
12. Petrosyants K. O., Kozhukhov M. V. SiGe HBT Performance Modeling after Proton Radiation Exposure, *Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS)*, 2012, pp. 274.
13. Petrosyants K. O., Vologdin E. N., Kozhukhov M. V. SiBJT and SiGe HBT Performance Modelling after Neutron Radiation Exposure, *Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS)*, 2011, pp. 267–270.
14. Petrosyants K. O., Sambursky L. M., Kharitonov I. A., Yatmanov A. P. SOI/SOS MOSFET compact macromodel taking into account radiation effects, *Russian Microelectronics*, 2011, vol. 40, Iss. 7, pp. 457–462.
15. Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Popov D. A. Coupled TCAD-SPICE simulation of parasitic BJT effect on SOI CMOS SRAM SEU, *Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS)*, 2013, pp. 312–315.
16. Label K., Barth J. An Insider's Guide to Designing Spacecraft Systems and Instruments for Operation in the Natural Space Radiation Environment, *Proc. of GSFC Systems Eng. Seminar*, 2001, pp. 562.
17. Danilin N., Shipilov K. Osobennosti primeneniya novoy jelektronno-komponentnoj bazy v kosmicheskikh razrabotkakh, *Vestnik elektroniki*, 2012, no. 2 (40), pp. 42–45.
18. Prokopenko N. N., Budiakov A. S., Savchenko E. M. Operacionnye usiliteli s obobshhennoj tokovoj obratnoj svyaz'ju, *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem* — 2008. Sbornik nauchnykh trudov. Pod obshh. red. A. L. Stempkovskogo, Moscow, IPPM RAS, 2008, pp. 330–333.
19. Petrosyants K. O., Kharitonov I. A. VLSI device parameters extraction for radiation hardness modeling with SPICE, *Proc. of IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures*, 1993, pp. 9–14.
20. Petrosyants K. O., Sambursky L. M., Kharitonov I. A. A Compact SOI/SOS MOSFET Macromodel Accounting for Radiation Effects, *Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS)*, 2007, pp. 360–364.
21. Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Orekhov E. V., Sambursky L. M., Yatmanov A. P. Simulation of Radiation Effects in SOI CMOS Circuits with BSIMSOI-RAD macromodel, *Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS)*, 2009, pp. 243–246.
22. Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Sambursky L. M., Bogatyrev V. N., Povarnitsyna Z. M., Drozdov E. S. Simulation of total dose influence on analog-digital SOI/SOS CMOS circuits with EKV-RAD macromodel, *Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS)*, 2012, pp. 60–65.
23. Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Sambursky L. M. Hardware-Software Subsystem for MOSFETs Characteristic Measurement and Parameter Extraction with Account for Radiation Effects, *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 718–720, pp. 750–755.
24. Petrosyants K. O., Adonin A. S., Kharitonov I. A., Sicheva M. V. SOI device parameter investigation and extraction for VLSI radiation hardness modeling with SPICE, *Proc. of IEEE International Conference on Microelectronic Test Structure*, 1994, pp. 126–129.
25. Enz C. C., Krummenacher F., Vittoz E. A. An analytical MOS transistor model valid in all regions of operation and dedicated to low-voltage and low-current applications, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 1995, vol. 8, no. 1, pp. 83–114.
26. Petrosyants K. O., Bogatyrev V. N., Gomanilova N. B., Povarnitsyna Z. M., Shchekin A. A., Kharitonov I. A., Sambursky L. M. *Proektirovanie radiacionno-stojkogo precizionnogo usilitelja na baze SOS CMOS tehnologii*. Sbornik nauchnykh trudov "Elektronika, mikro- i nanoelektronika". Pod red. V. Ja. Stenina, Moscow, MEPhI, 2013, pp. 196–302.
27. Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Sambursky L. M., Orekhov E. V., Cherny A. I., Povarnitsyna Z. M., Bogatyrev V. N., Prokofiev G. V. *Issledovanie harakteristik jelementnoj bazy analogovykh SOI CMOS shem, izgotovlennykh po tehnologii XFAV, s uchjotom summarnoj pogloshhjonnoj dozy*. Sbornik nauchnykh trudov "Elektronika, mikro- i nanoelektronika". Pod red. V. Ja. Stenina, Moscow: MEPhI, 2009, pp. 57–66.