

# Исследование и разработка структур для экстракции параметров моделей схемотехнического учета дозовых радиационных эффектов субмикронных СБИС

А.И. Титов, Н.А. Шелепин, А.В. Селецкий

ОАО «НИИМЭ», atitov@mikron.ru

**Аннотация** — Рассматриваются проблемы схемотехнического моделирования радиационных эффектов, возникающих в субмикронных СБИС. Представлена разработка минимального набора тестовых структур для экстракции радиационно-зависимых параметров КМОП транзисторов, изготавливаемых по технологии объёмного кремния.

**Ключевые слова** — КМОП, космическое излучение, радиационная стойкость.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Радиационная стойкость интегральных схем является важным условием для проектирования систем космического и аэрокосмического применения. Радиация в космическом пространстве обусловлена наличием источников ионизирующего излучения, находящихся как в границах Солнечной системы, так и за её пределами.

Длительные космические полёты в рамках программ по освоению Марса связаны с нахождением систем управления космических аппаратов (КА) в космосе, что приводит к большой дозе накопленного излучения [1]. Длительное нахождение спутников на геостационарной орбите также приводит к деградации отдельных элементов интегральных схем (ИС), что необходимо учитывать при проектировании данных аппаратов [2].

Учёт особенностей работы интегральных схем в таких длительных полётах является важным направлением современной электроники.

## II. ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

К основным проблемам, возникающим при нахождении ИС под воздействием радиации, можно отнести:

- 1) ионизация материала ИС;
- 2) структурные повреждения материалов ИС;
- 3) выделение тепла.

Структурные повреждения (образование радиационных дефектов внутри кристаллической решётки) в объёме кремния оказывают воздействия на электрофизические свойства материалов: снижение подвижности и времени жизни носителей, а также их концентрации. Данные структурные эффекты имеют

большое значение при проектировании биполярных ИС. В то же время КМОП ИС малочувствительны к данным эффектам, так как МОП транзисторы являются приборами на основных носителях [3].

Поверхностные радиационные эффекты связаны с накоплением зарядов в слоях подзатворных и изолирующих диэлектриков, а также с изменениями характеристик границ раздела. Данные эффекты, в основном, определяют отказы ИС под воздействием космической радиации [3,4].

Влияние поверхностных радиационных эффектов сказывается на изменении параметров элементов ИС:

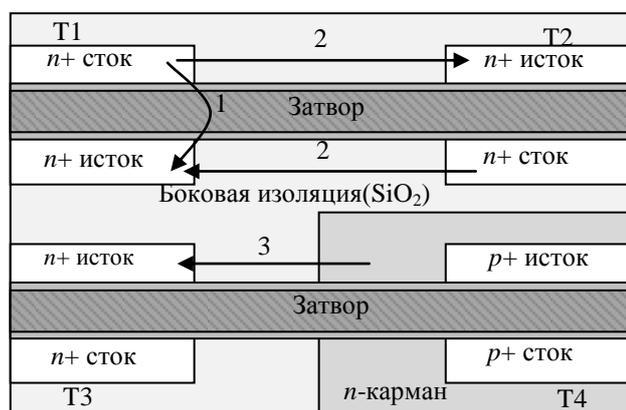
- 1) сдвиг порогового напряжения под воздействием накопленного заряда в подзатворном диэлектрике,
- 2) уменьшение подвижности носителей из-за рассеивания свободных носителей в приповерхностной области полупроводника,
- 3) возникновение утечек вдоль диэлектрической боковой изоляции.

В современных СБИС с технологическими нормами 180-90 нм влияние радиационного излучения на смещение порогового напряжения транзисторов резко снижается, поэтому доминирующее влияние на стойкость субмикронных СБИС к полной поглощённой дозе оказывает повышение внутрисхемных утечек в результате возникновения дополнительных путей протекания тока [4]. Поэтому в данной работе рассматривается влияние радиации только на возникновение путей утечек в объёмном кремнии. Рассмотрим данный процесс более подробно.

Воздействие ионизирующего излучения приводит к возникновению электронно-дырочных пар в кремнии, областях STI (Shallow Trench Isolation - мелкая щелевая изоляция) и подзатворном диэлектрике. Большая их часть рекомбинирует в течение очень короткого промежутка времени. Оставшаяся часть под действием внутренних и внешних электрических полей в окисле начинает двигаться. Электроны, имеющие большую подвижность, перемещаются к аноду, а дырки, имеющие низкую подвижность, захватываются на ловушках в диэлектриках КМОП интегральной схемы, обусловленных наличием оборванных связей в структуре оксида. В случае, если изолятор граничит с легированной областью *n*-типа, это приведет к

обогащению области на границе раздела и дополнительному запираению паразитных структур. Однако, если изолятор граничит с кремнием, легированным примесью  $p$ -типа, это приведет к обеднению приповерхностной области. При увеличении количества захваченного положительного заряда в кремниевой подложке на границе с оксидом произойдет слабая, а затем и сильная инверсия типа проводимости (образуется паразитный канал  $n$ -типа). Основные виды радиационно-индуцированных утечек вдоль STI изображены на рис. 1, их можно классифицировать следующим образом [5]:

- 1) Между стоком и истоком  $n$ -канального транзистора - канал будет проходить через приповерхностную область по боковой стенке STI в месте пересечения её с затвором. В дальнейшем этот механизм именуется внутритранзисторной утечкой.
- 2) Между стоками и истоками соседних  $n$ -канальных транзисторов - канал будет проходить через донную область STI (межтранзисторная утечка).
- 3) Между  $n$ -карманом  $p$ -канального транзистора и истоком  $n$ -канального транзистора.



**Рис. 1. Схематическое изображение утечек, индуцированных воздействием накопленной дозы ионизирующего излучения. Заштрихованная область – тонкий подзатворный диэлектрик**

При использовании технологий на базе КНИ/КНС автоматически устраняются межтранзисторные утечки ввиду полной диэлектрической изоляции дискретных элементов, однако наличие скрытого изолятора усугубляет проблему внутритранзисторных утечек.

В работе исследуется проблема прогнозирования радиационной стойкости КМОП элементов СБИС на объемном кремнии с субмикронными и наноразмерными топологическими нормами к эффектам накопленной дозы ионизирующего излучения.

### III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Прогнозирование и расчёт утечек паразитных радиационных элементов необходим на этапе разработки схемы и топологии, так как их учёт может позволить принять меры конструктивной защиты. Учет радиационных эффектов на данном этапе может быть

осуществлён с помощью средств приборно-технологического моделирования (например, TCAD Sentaurus) или путем экстракции паразитных элементов из топологии ИС. Использование приборно-технологического моделирования требует предварительной калибровки, кроме того этот метод применяется только для моделирования отдельных транзисторов или вентилях. Поэтому для учёта радиационных факторов в ИС принято использовать компактные (электрические) модели, отличающиеся меньшей точностью и большей скоростью расчёта.

Стандартные компактные модели, используемые в SPICE-симуляторах для анализа ИС и СБИС, не учитывают радиационные эффекты. В современных САПР есть несколько способов учёта этих эффектов в компактных моделях.

Первый способ состоит в формировании набора программных функций на языках C, Verilog-AMS и прочих, которые описывают радиационные эффекты и подключаются к стандартной модели динамически (во время выполнения программы) или статически.

Второй способ состоит в использовании методик учёта радиационных воздействий на основе базиса схемных моделей, уже включённых в библиотеку САПР. Этот подход предполагает включение в эквивалентную схему СБИС дополнительных элементов таким образом, чтобы отобразить влияние радиационных эффектов.

Третий способ состоит в сочетании первых двух: часть влияния ионизирующего излучения описывается схемотехническими элементами, часть – с помощью программных аппроксимирующих функций [6].

Каждый из указанных методов имеет свои достоинства и недостатки. Подход на базе C/Verilog-AMS позволяет добиться высокой скорости симуляции, однако такой подход не является приемлемым при поддержке широкого круга САПР для схемотехнического моделирования по причине отличий механизмов подключения к процессу симуляции. В то же время использование схемотехнических моделей для описания воздействия радиации позволяет использовать все САПР с поддержкой соответствующих приборов. Основной проблемой такого подхода является необходимость получения дополнительных (паразитных) структур из исходной электрической схемы и топологии ИС.

По данным работ [6,7], для технологий на базе КНИ учёт воздействия ионизирующего излучения успешно реализуется путём составления специальной упрощённой макромодели (написанной на Verilog-A), подключаемой к моделям элементов ИС, и модификации схемотехнических моделей. При этом параметры исходной модели остаются без изменений, а влияние радиации учитывается на основе параметров напряжения на затворе при облучении и значения накопленной дозы. Однако данный метод не применим к технологии объемного кремния ввиду наличия механизма межтранзисторной утечки.

С другой стороны, в работе [8] показана высокая эффективность методики смешанного моделирования радиационных эффектов (включения в эквивалентную схему дополнительных элементов, а также введения в модель аппроксимирующих выражений для параметров, зависящих от внешних факторов и электрического режима).

Методика смешанного моделирования является применимой для описания воздействий ионизирующих излучений в технологии на объёмном кремнии. В данной работе, ввиду принятых приближений субмикронных технологий, будет рассматриваться подход, основанный на использовании дополнительных схмотехнических элементов для учёта радиационно-индуцированных утечек в ИС.

Таким образом, задача учёта радиационных эффектов в КМОП СБИС формулируется следующим образом:

- 1) Создание SPICE-моделей паразитных элементов, обуславливающих возникновение внутритранзисторной и межтранзисторной утечек и утечки между стоком и *n*-карманом *p*-канального транзистора.
- 2) Реализация процесса автоматической экстракции данных элементов из топологии и симуляции экстрагированной схемы ИС.

Для решения первой из указанных задач необходимо определить дополнительные паразитные элементы и произвести экстракцию параметров их

SPICE моделей. Для экстракции паразитных элементов из топологии ИС необходима разработка алгоритма экстракции.

#### IV. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для определения необходимых схмотехнических элементов паразитных структур необходимо представить радиационно-индуцированные токи утечки в виде паразитных транзисторов. На рис. 2. изображена эквивалентная электрическая схема для фрагмента топологии, изображенного на рис. 1.

На рис. 2. транзисторы T1-4 соответствуют реальным транзисторам, изображенным на рис. 1.

T5, T6, T7 – элементы для учёта влияния утечки между стоком и истоком *n*-канального транзистора. Канал данных транзисторов формируется в приповерхностной области STI в месте пересечения её с поликремниевым затвором топологических транзисторов T1-T3. Сток и исток данных транзисторных элементов совпадает со стоком и истоком соответствующих топологических транзисторов. Данный канал утечки формируется у всех *n*-канальных транзисторов и зависит только от длины затвора.

T8, T9 – элементы для учёта утечки между стоками и истоками соседних *n*-канальных транзисторов. В качестве подзатворного диэлектрика будет выступать область STI, а канал в данном случае будет проходить вдоль ее донной части. Геометрическое расположение

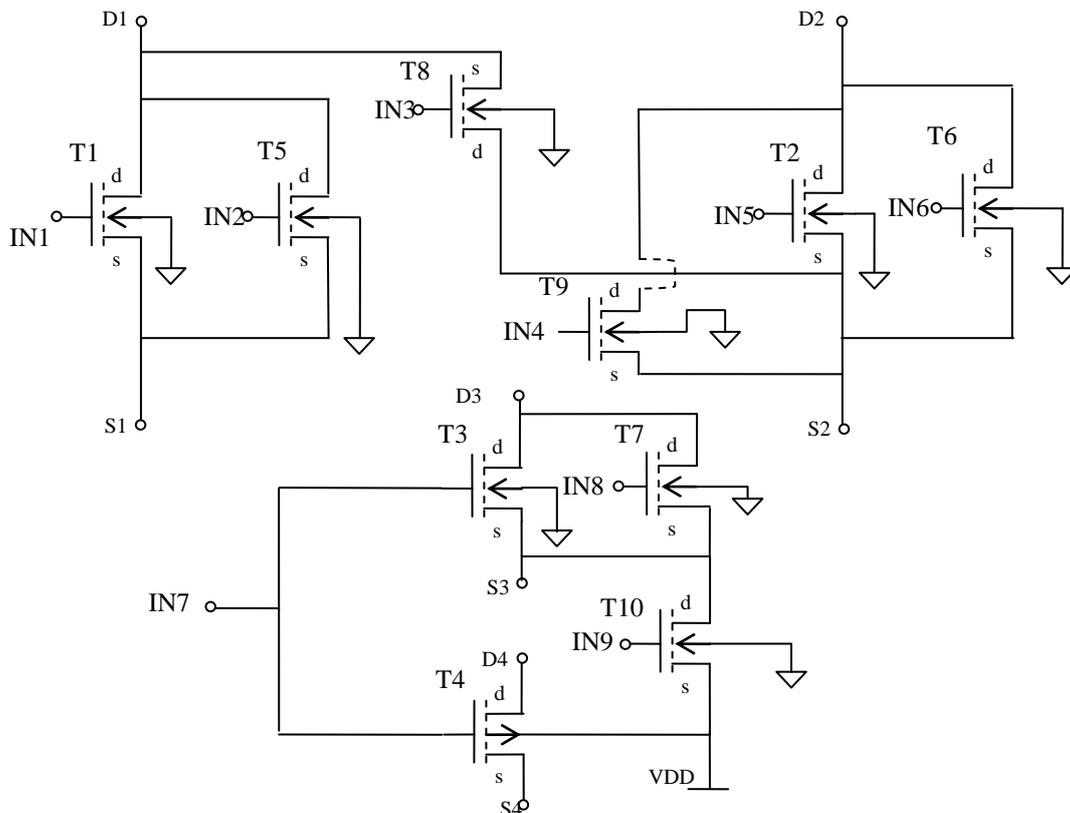


Рис. 2. Электрическая схема топологической структуры с учётом паразитных транзисторов

соседних  $n$ -канальных транзисторов и наличие в этой области поликремния поверх STI будет оказывать влияние на параметры модели этого паразитного элемента.

T10 – элемент для учёта утечки между истоком  $n$ -канального транзистора и  $n$ -карманом  $p$ -канального транзистора. Канал данного транзистора формируется под STI между соответствующими областями транзисторов T3 и T4.

Длина канала подобных паразитных транзисторов будет далека от минимальной в силу глубины залегания STI и составляет не менее 1 мкм для технологической нормы 180 нм. С увеличением расстояния между двумя транзисторами будет возрастать сопротивление открытого паразитного транзистора и, следовательно, уменьшаться ток утечки. Так как в технологиях на базе объёмного кремния отдельные транзисторы не изолированы по подложке, в реальной топологии количество каналов утечки будет соизмеримо с количеством  $n$ -канальных транзисторов, возведенных в квадрат. Т.к. для СБИС эта величина является колоссальной, необходимо определить максимальное удаление между двумя транзисторами, при котором радиационно-индуцированной утечкой можно пренебречь.

Экстракция паразитных элементов непосредственно из топологии СБИС позволит произвести учёт утечек, возникающих при воздействии радиации. Это поможет обнаружить наиболее чувствительные к воздействию специальных факторов элементы и цепи, и произвести их перепроектирование с учётом возросшего токопотребления. В технологиях на базе объёмного кремния межтранзисторные утечки в значительной степени зависят не только от геометрических размеров отдельных транзисторов, но и от их взаимного расположения, поэтому на основе анализа тока утечки возможно минимизировать его величину топологическими изменениями.

Дополнение электрической схемы паразитными элементами очевидно приводит к усложнению процесса моделирования и увеличению времени этого процесса. В частности, как видно из схемы на рис. 2, на два топологических транзистора приходится минимум 2 паразитных элемента. Для схемотехнического моделирования при технологических нормах 180-90 нм используются модели транзисторов уровня BSIM3/BSIM4. В то же время для паразитных транзисторов использование таких сложных моделей не является необходимым в связи с тем, что их длины каналов и толщины диэлектриков намного больше, чем у технологических транзисторов. Использование упрощенных моделей для паразитных элементов (в частности, моделей типа MOS3) позволит сократить влияние дополнительных транзисторов на время моделирования [9].

Для экстракции параметров SPICE-моделей паразитных транзисторов, описанных выше и учитывающих влияние радиации на элементы ИС,

необходимо формирование достаточного набора полупроводниковых тестовых структур.

## V. СОЗДАНИЕ НАБОРА ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР

Основная сложность при учёте утечек в технологиях на базе объёмного кремния возникает из-за неоднородности путей протекания тока. В более сложных случаях требуется учитывать несимметричность топологии, наличие или отсутствие поликремния между рассматриваемыми транзисторами. При разработке ИС с высокими функциональными характеристиками топология элементов формируется таким образом, чтобы добиться максимального быстродействия и минимального потребления, поэтому топология транзисторов и их взаимное расположение оптимизируются для достижения этих факторов. Как известно из литературы [10], полевое воздействие усугубит радиационные утечки, поэтому для разработки корректной модели учёта радиационных эффектов необходимо учитывать гипотетическую возможность расположения затворов поверх STI (область 2 на рис. 3), вдоль которой формируется радиационно-индуцированный канал.

### A. Межтранзисторная утечка

Необходимо сформировать набор тестовых структур, наиболее точно учитывающих каждый механизм радиационно-индуцированных утечек. Конструктивное исполнение также должно исключать возникновение в тестовой структуре сразу нескольких механизмов утечки, так как в данном случае невозможно интерпретировать результаты измерений.



Рис. 3. Схематическое изображение путей протекания тока утечки в области STI, свободной от поликремния (1) и под поликремнием (2)

Как было указано в разделе II, межтранзисторная утечка формируется в донной области STI между областями стока и истока соседних транзисторов. Для исследования данной утечки необходима структура, состоящая из областей  $n+$  стока и истока, разделённых STI, разрез такой структуры приведён на рис. 4.

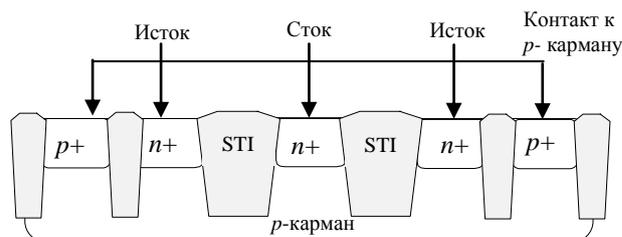


Рис. 4. Разрез структуры TC1

Из-за особенностей разработки КМОП СБИС над слоем STI, вдоль нижней границы которого будет протекать ток утечки, может быть расположен затворный поликремний.

Влияния такого расположения можно оценить, сформировав поликремний поверх STI, как это сделано в структуре, изображённой на рис. 5.

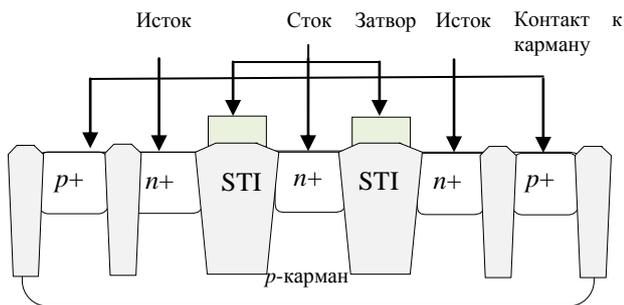


Рис. 5. Разрез структуры TC2

Для обеспечения корректности результатов внутритранзисторная утечка и утечка на  $n$ -карман должны быть конструктивно минимизированы. Утечка на  $n$ -карман для структур TC1 и TC2 минимизируется путём формирования охранного  $p^+$  кольца. Для устранения влияния утечки через приповерхностную область по боковой стенке STI в месте пересечения ее с затвором структуры TC1 и TC2 имеют кольцевую архитектуру (окружённый сток, затвор и исток замкнуты вокруг него по кольцу). Для случая, когда идеальная радиальная симметрия технологически не может быть произведена, необходимо разработать набор структур различных размеров (от минимально возможных до величин, при которых изгибы STI будут оказывать ничтожное влияние на результирующие токовые утечки).

Кроме того TC1 и TC2 должны иметь широкий диапазон длин затворов. Это позволит вычислить максимальное расстояние между  $N$ -канальными транзисторами, при котором необходимо учитывать межтранзисторную утечку.

#### В. Утечка на $n$ -карман

Для исследования утечки на  $n$ -карман необходимо сформировать структуру, содержащую как  $n$ -карман, так и  $p$ -карман. Для данной задачи может быть использована структура, изображённая на рис. 6.

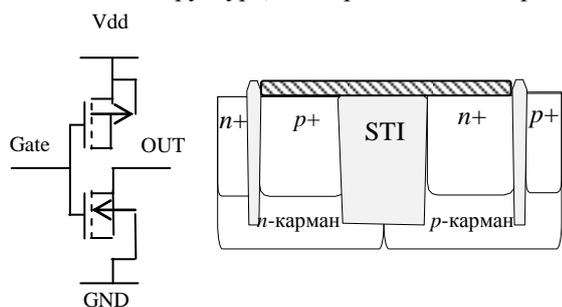


Рис. 6. Разрез структуры TC3 и её электрическая схема. Заштрихованная область – поликремний

TC6 представляет собой последовательные слои  $n^+/p$ -карман/ $n$ -карман/ $n^+$  и моделирует случай радиационно-индуцированной утечки между близкорасположенными  $n$ - и  $p$ -структурами. Как и в случае с межтранзисторной утечкой необходимо учесть возможное влияние поликремния на паразитный канал, поэтому была сформирована структура, указанная на рис. 7.

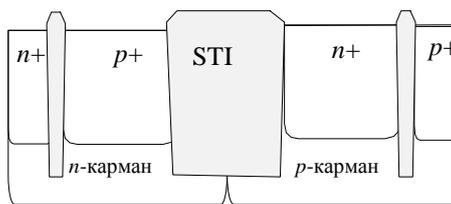


Рис. 7. Разрез структуры TC4

В данном случае межтранзисторную утечку можно минимизировать путём формирования охранного  $p^+$  кольца по периметру  $p$ -кармана (кроме стыка  $p$ -кармана и  $n$ -кармана). Утечки внутри транзистора также будут отсутствовать, если сток и исток  $n$ -канального транзистора электрически замкнуть (как указано на электрической схеме на рис. 7). Для исследования краевых эффектов и максимального расстояния между транзисторами, при котором необходимо учитывать утечку, целесообразно произвести вариацию ширины STI и длин областей  $p^+$  и  $n^+$ .

#### С. Внутритранзисторная утечка

Для исследования внутритранзисторной утечки была выбрана структура на базе одиночного линейного  $n$ -МОП транзистора (см. рис. 8).

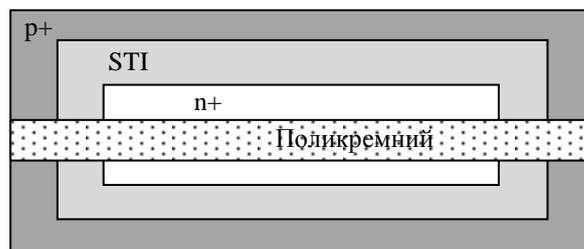


Рис. 8. Эскиз структуры TC5

При воздействии радиационных факторов между стоком и истоком транзистора образуется паразитный канал, соответствующий исследуемой утечке.

Для получения зависимости утечки от длины канала необходима вариация длины канала транзистора (от минимальной до максимальной, доступной в технологии). Подавление межтранзисторных утечек достигается большим удалением от соседних  $n$ - и  $p$ - транзисторов.

Таким образом, предложенный набор структур TC1-TC5 способен охватить весь диапазон механизмов утечек, возникающих в КМОП транзисторах технологии объёмного кремния: внутритранзисторную

утечку, утечку между стоком и истоком  $n$ -канального транзистора и утечку на  $n$ -карман.

Исходя из вышеизложенного можно сделать утверждение, что предложенный набор тестовых структур достаточен для экстракции параметров SPICE-моделей паразитных элементов, возникающих при воздействии радиации на транзисторные элементы ИС.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема учёта влияния воздействия радиации на элементы СБИС является критически важной для проектирования систем управления КА и иных ИС, подвергающихся длительному воздействию космической радиации. Проведённые исследования показали возможность формирования схемотехнических моделей, способных учитывать полный спектр влияния ионизирующего излучения на утечки МОП элементов СБИС.

Была произведена декомпозиция токов утечек, возникающих в элементах ИС под воздействием ионизирующего излучения, и выделены паразитные схемотехнические элементы, введение которых обеспечит согласование параметров токов утечек с экспериментальными данными.

Для подтверждения и возможности коррекции схемотехнических моделей паразитных элементов был разработан минимальный необходимый и достаточный набор полупроводниковых структур для измерений. Данные структуры находятся в стадии технологического производства.

К основным достоинствам предложенной методики формирования набора структур можно отнести:

1) Возможность учёта токов внутритранзисторной и межтранзисторной утечки, а также утечки между стоком и  $n$ -карманом  $p$ -канального транзистора. Это необходимо для проверки работоспособности теоретической SPICE модели, учитывающей данные токи.

2) Предложенная методика применима к большинству современных технологий изготовления КМОП СБИС.

В то же время присутствуют и недостатки:

1) Отсутствуют структуры для исследования сдвига порогового напряжения и снижения подвижности носителей.

2) Не решена задача автоматической экстракции данных паразитных элементов из топологии ИС.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mars' Surface Radiation Environment Measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity / Donald M. Hassler, Cary Zeitlin, Robert F. Wimmer-Schweingruber, Bent Ehresmann, Scot Rafkin, Jennifer L. Eigenbrode, David E. Brinza, Gerald Weigle, Stephan Böttcher, Eckart Böhm, Soenke Burmeister, Jingnan Guo, Jan Köhler, Cesar Martin, Guenther Reitz, Francis A. Cucinotta, Myung-Hee Kim, David Grinspoon, Mark A. Bullock, Arik Posner, Javier Gómez-Elvira, Ashwin Vasavada, John P. Grotzinger, MSL Science Team // URL: <http://www.sciencemag.org/content/early/2013/12/05/science.1244797.full.pdf?ijkey=O0XhFmLAOd8IY&keytype=ref&siteid=sci> (дата обращения: 10.10.2013).
- [2] Lohmeyer W.Q., Cahoy K. Space weather radiation effects on geostationary satellite solid-state power amplifiers // Space Weather. August 2013. Vol. 11. № 8. P. 476-488.
- [3] Кузнецов Н.В., Соловьев Г.Г. Радиационная стойкости кремния. М.: Энергоатомтздат, 1989. 96 с.
- [4] Поверхностные радиационные эффекты в интегральных схемах / Согоян А.В., Зебрев Г.И., Никифоров А.Ю., Першенков В.С., Чумаков А.И // URL: [http://micro.ax-09.ru/present/zebrev\\_mar07/rad\\_effects\(draft\).pdf](http://micro.ax-09.ru/present/zebrev_mar07/rad_effects(draft).pdf). (дата обращения: 10.10.2013).
- [5] Селецкий А.В., Шелепин Н.А. Оценка конструктивно-технологических возможностей повышения радиационной стойкости глубоко-субмикронных СБИС // V Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2012». Сб. тр. / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИПИМ РАН, 2012. С. 588-593.
- [6] Экстрактор радиационно-чувствительных параметров BSIMSOI для симулятора SPECTRE / Горбунов М.С., Шнайдер А.И., Петрова М.М., Зебрев Г.И // Научная сессия МИФИ-2008. Сб. научных тр. М., 2008. Т. 8. С. 131-132.
- [7] Разработка программы для экстракции параметров системы моделей bsim 3v3 для целей прогнозирования радиационного отклика микросхем / Третьяченко Т.И., Ватутина К.С., Горбунов М.С., Зебрев Г.И. // Научная сессия МИФИ-2006. Сб. научных тр. конференции «Молодёжь и наука». М., 2006. Т. 16. С. 74-75.
- [8] Самбурский Л.М. Разработка и исследование схемотехнических SPICE-моделей элементов радиационно-стойких и фоточувствительных КМОП БИС со структурой КНИ / КНС // URL: <http://www.hse.ru/data/2013/12/20/1338829495/avtoref%20sambur.pdf> (дата обращения: 10.10.2013).
- [9] SOI/SOS MOSFET Compact Macromodel Taking into Account Radiation Effects / К.О. Petrosyants, L.M. Sambursky, I.A. Kharitonov, A.P. Yatmanov // Russian Microelectronics. December 2011. Vol. 40. № 7. P. 457-462.
- [10] Ma T.P., Dressendorfer P.V. Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits. N.Y.: John Wiley and Sons, 1989. 588 p.