

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ И ОБРАТИМЫХ ОТКАЗОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ TCAD Sentaurus

П.Тихомиров, П.Пфефли, Р.Боргес

Автоматизированные системы приборно-технологического проектирования (TCAD) позволяют исследовать широкий круг проблем, связанных с отказоустойчивостью полупроводниковых приборов в составе интегральных схем. К их числу можно отнести электрическую деградацию приборов, обусловленную инжекцией горячих носителей, генерацию дефектов в диэлектрике из-за радиационного излучения, сбои в функционировании приборов вследствие взаимодействия с единичными высокоэнергетическими частицами, а также эффекты неуправляемого лавинного пробоя и электростатического разряда. Рассмотрим три примера, демонстрирующие, как с помощью программного комплекса Sentaurus TCAD от Synopsys можно анализировать типичные проблемы функционирования полупроводниковых приборов, возникающие в результате воздействия внутренних и внешних факторов.

## ДЕГРАДАЦИЯ ПРИБОРОВ, ВЫЗВАННАЯ ИНЖЕКЦИЕЙ ГОРЯЧИХ НОСИТЕЛЕЙ

Программный комплекс Sentaurus TCAD [1] традиционно используется для моделирования эффектов влияния поверхностных дефектов на работу полупроводниковых приборов. Отдельная задача – исследование эффектов деградации, связанных с генерацией ловушек в сильноточных режимах работы транзисторов, что представляет особый интерес для разработчиков мощных силовых приборов, применяемых, например, в технологиях smart-power для автомобильной электроники [2]. Генерация дополнительных дефектов (глубоких зарядовых ловушек) на границе раздела кремний-окисел и в объеме подзатворного диэлектрика приводит к сдвигу пороговых напряжений МОП-транзисторов,

а также снижению подвижности носителей в канале из-за кулоновского рассеяния электронов и дырок на зарядах, расположенных в объеме диэлектрика, а также на зарядах поверхностных состояний.

Главная причина электрической деградации МОП-транзисторов – инжекция горячих носителей из области канала. Для расчета тока горячих носителей требуется точно рассчитать неравновесную функцию распределения электронов и дырок по энергиям. В примере, который рассматривается далее, для расчета функции распределения используется метод разложения по сферическим гармоникам (spherical harmonic expansion – SHE) [3]. Зная функцию распределения по энергиям, мы получаем возможность вычислить ток инжекции горячих носителей в подзатворный диэлектрик и оценить количество

дополнительно генерируемых ловушек на основе модели деградации дефектов на поверхности кремний-окисел и в объеме диэлектрика.

В качестве примера моделирования электрической деградации прибора выбран мощный LDMOS-транзистор (МОП-транзистор с поверхностной диффузией) с типовыми размерами активной и пассивной областей канала. Процесс моделирования включает в себя четыре этапа (рис.1). На первом этапе транзистор переводится в рабочую точку, соответствующую открытому состоянию прибора. Затем осуществляется моделирование деградации транзистора в режиме открытого канала в течение достаточно длительного интервала времени (этап № 2). На третьем этапе производится экстракция пространственно неоднородного распределения ловушек, полученного в результате моделирования деградации прибора во времени, которое необходимо для оценки изменения характеристик прибора (порогового напряжения и рабочего тока).

Из-за существенного разогрева МОП-транзистора в режиме открытого канала, кроме переноса заряда, рассчитывают также перенос тепла в структуре прибора (рис.2). На втором этапе моделировалась генерация дефектов на границе кремний-окисел и в объеме подзатворного диэлектрика на основе



Рис.1. Схема процесса моделирования электрической деградации LDMOS-транзистора

кинетической модели деградации. Моделирование осуществлялось на заданном временном интервале (полгода), дискретизация которого производилась программой автоматически. При этом на каждом временном шаге оценивались ток инжекции горячих носителей и дрейф тока стока в связи с генерацией избыточных ловушек и их перезаряда.

## Расширение возможностей КМОП с TCAD

### Junction Engineering

### Stress Engineering

### Device Optimization

CMOS Device Performance

### Device Variability

Random Dopant Fluctuation (RDF) Oxide Thickness Variation (OTF)

### SRAM Cell Optimization

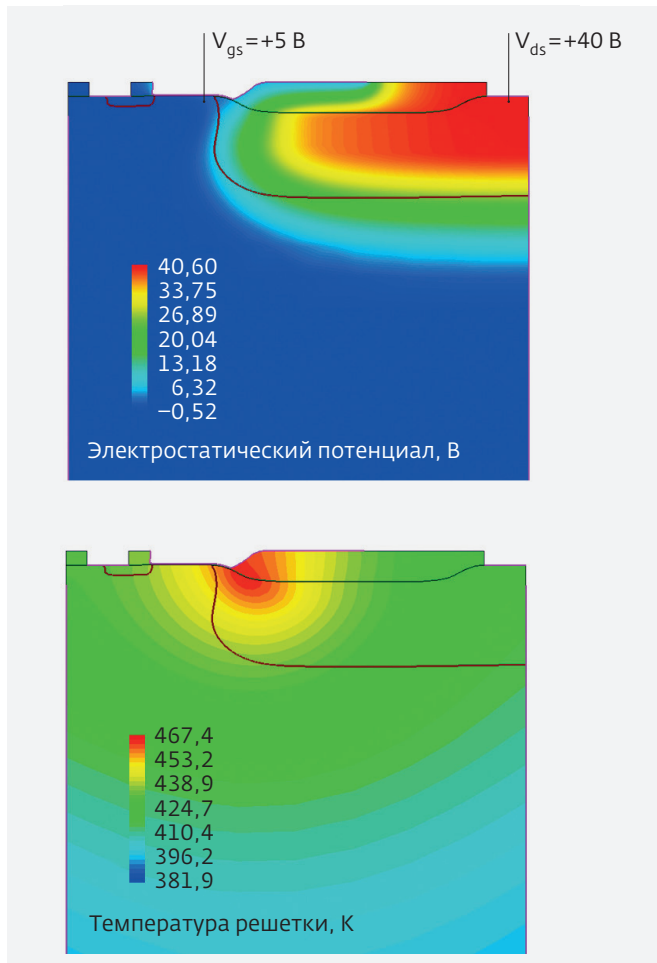
Read Butterfly & Static Noise Margin (SNM)

### Pathfinding: FitFET

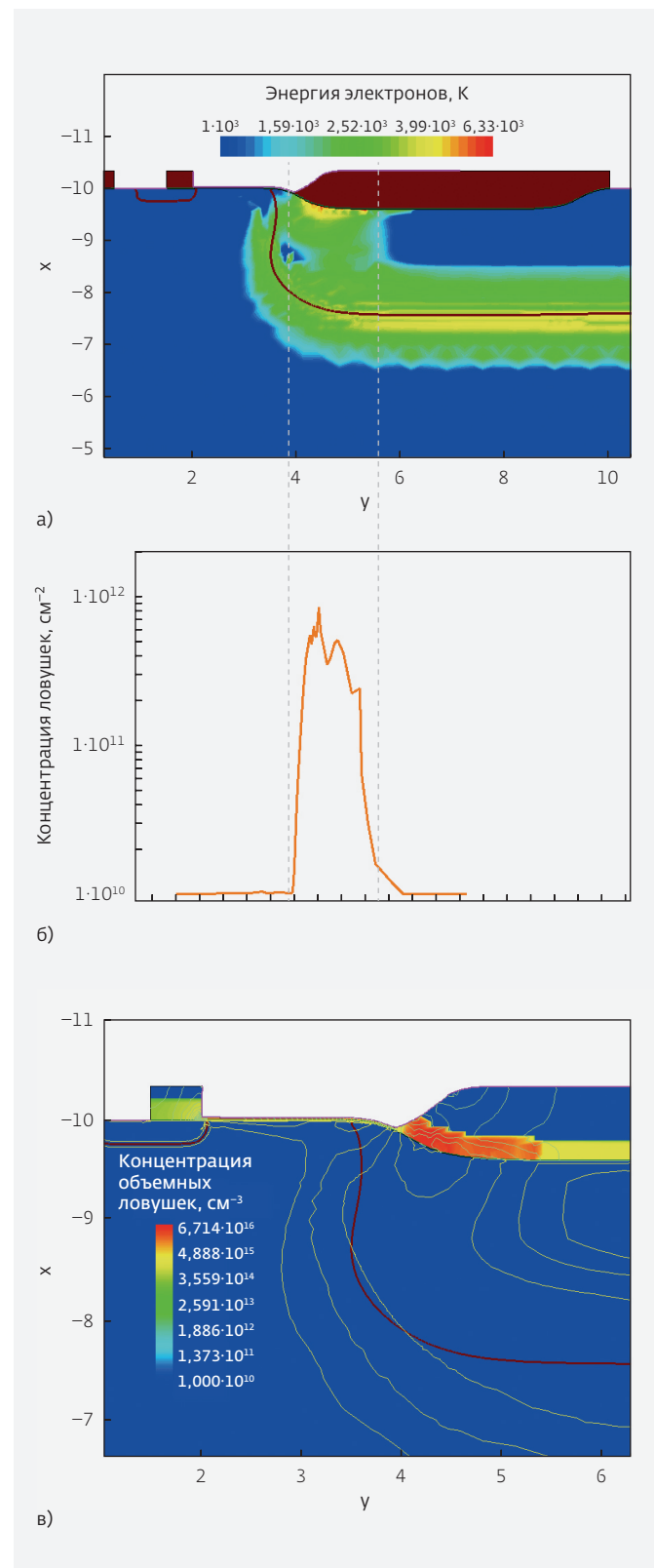
Impact of FitFET S/D Shape on Stress, Rcont and Crap

С помощью приборного симулятора Sentaurus Device были получены пространственное распределение энергии электронов, рассчитанное методом SHE, профиль распределения акцепторных ловушек на границе кремний-окисел и конечный профиль распределения донорных ловушек в окисле, как результат длительного воздействия электрической нагрузки на МОП-транзистор (рис.3).

Согласно используемой методике моделирования, генерируемые на поверхности раздела кремний-окисел ловушки ведут себя, как акцепторы (накапливают отрицательный заряд), а объемные ловушки в окисле – как доноры (накапливают положительный заряд). Этим обусловлено так называемое "двух-асимптотное" поведение прибора: вначале деградация определяется доминированием дефектов, генерируемых на границе раздела кремний-окисел;



**Рис.2.** Распределение электростатического потенциала (вверху) и температуры решетки в объеме транзистора (внизу), полученное на первом этапе процесса моделирования (область наибольшего разогрева показана красным цветом)



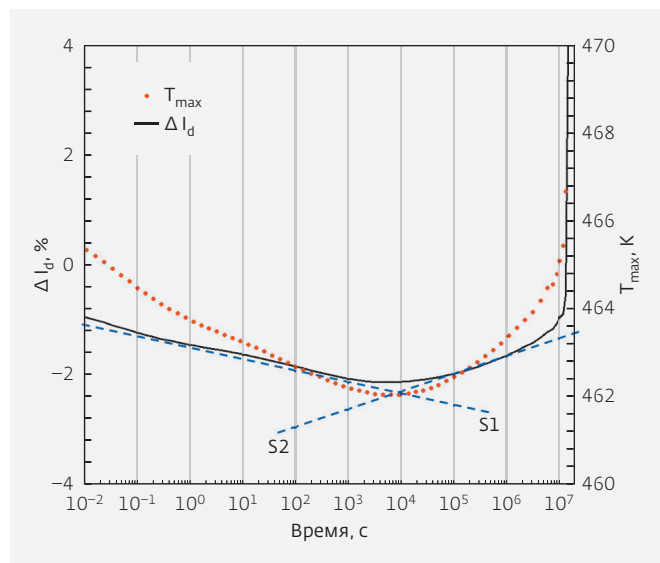
**Рис.3.** а – пространственное распределение энергии электронов; б – распределение ловушек на границе Si-SiO<sub>2</sub>; в – распределение объемных ловушек в окисле и изолинии электрического поля

но в некоторый момент времени преобладающей становится деградация за счет генерации объемных дефектов. При этом асимптотический наклон зависимости тока стока от времени меняется с отрицательного на положительный (рис.4).

## ДЕГРАДАЦИЯ КНИ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Радиационное облучение полупроводниковых приборов гамма-частицами или рентгеновскими лучами относится к типу воздействий, приводящих к отказу прибора. Причиной отказа является электрическая деградация прибора вследствие аккумуляции заряда на ловушках, генерируемых в объеме окисла и на поверхности раздела кремний-диэлектрик.

В качестве примера рассмотрим п- и р-канальные МОП-транзисторы с "плавающей" подложкой, выполненные по технологии кремний-на-изоляторе (КНИ), которые подвергаются воздействию гамма-частиц и рентгеновского излучения. Для моделирования воздействия радиации используется модель полной дозы ионизации (Total Ionizing Dose – TID), которая реализована в приборном симуляторе Sentaurus Device. Данное решение основано на идее, опубликованной в [4] и получившей дальнейшее развитие



**Рис.4.** Относительное изменение тока стока в процессе деградации характеризуется двумя асимптотами: первая (S1) связана с генерацией дефектов на границе раздела кремний-окисел; вторая (S2) обусловлена генерацией объемных дефектов в окисле (красная кривая – изменение максимальной температуры решетки структуры прибора)

в [5], согласно которой скорость генерации электронно-дырочных пар в объеме полупроводникового прибора связана с дозой излучения  $D$  через функцию выхода  $Y(E)$ :

$$G_r = g_0 \frac{dD}{dt} Y(\bar{E}), \quad (1)$$

где  $g_0$  – скорость генерации электронно-дырочных пар в единице объема для единичной дозы облучения (является свойством материала).

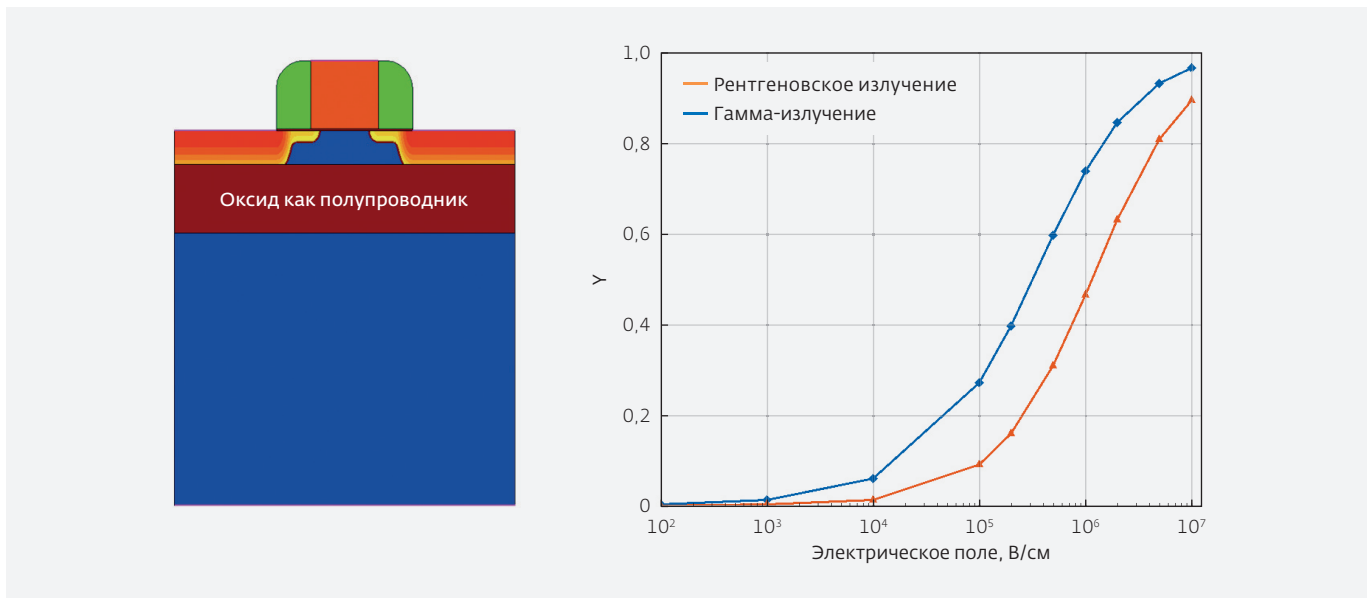
Функция выхода  $Y(E)$  выражает вероятность для электронно-дырочных пар, сгенерированных в результате взаимодействия высокоэнергетичных фотонов со структурой прибора, избежать их рекомбинации в пределах малого промежутка времени. Ее значение зависит от типа радиационного воздействия и свойств облучаемого материала (рис.5). При наличии сильного электрического поля наблюдается большая скорость генерации за счет более высоких значений  $Y(E)$ .

Диоксид кремния – чувствительный к радиации материал. Поскольку в симуляторе Sentaurus Device не предусмотрена возможность расчета ударной ионизации носителей в диэлектриках, чтобы рассчитать генерацию электронно-дырочных пар, диоксид кремния в данном примере рассматривается как широкозонный полупроводник. Рассчитанный профиль ударной ионизации преобразуется в профиль объемных ловушек заряда внутри диоксида кремния согласно [4].

Процедура моделирования прибора при воздействии радиации состоит из следующих этапов:

- прибор помещается в рабочую точку путем приложения соответствующих напряжений на затвор и сток;
- затем прибор подвергается радиационному воздействию;
- профиль скорости ударной ионизации, рассчитанный на предыдущем этапе по формуле (1) для модели TID (рис.6), преобразуется в пространственно неоднородный профиль ловушек в объеме диэлектрика и на границе диэлектрик-полупроводник;
- на последнем этапе оценивается сдвиг базовых характеристик облученного прибора с учетом профиля дефектов, рассчитанных на предыдущем этапе.

Для преобразования профиля ударной ионизации в профиль объемных ловушек в диэлектрике применяется модель, предложенная в [5]. Для расчета концентрации ловушек, расположенных на границе раздела кремний-диэлектрик, использовалась следующая зависимость:



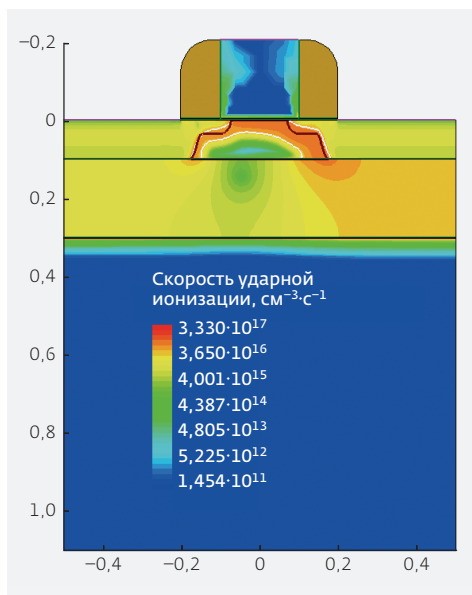
**Рис.5.** Моделируемая структура КНИ p-МОП-транзистора, в которой диоксид кремния представлен как широкозонный полупроводник (слева), и зависимость функции  $Y(E)$  от электрического поля для двух видов ионизирующего излучения (справа)

$$N_{it}(x,y) = a_{it} D^{b_{it}} \frac{G_{TID}(x,y)}{G_{max}}, \quad (2)$$

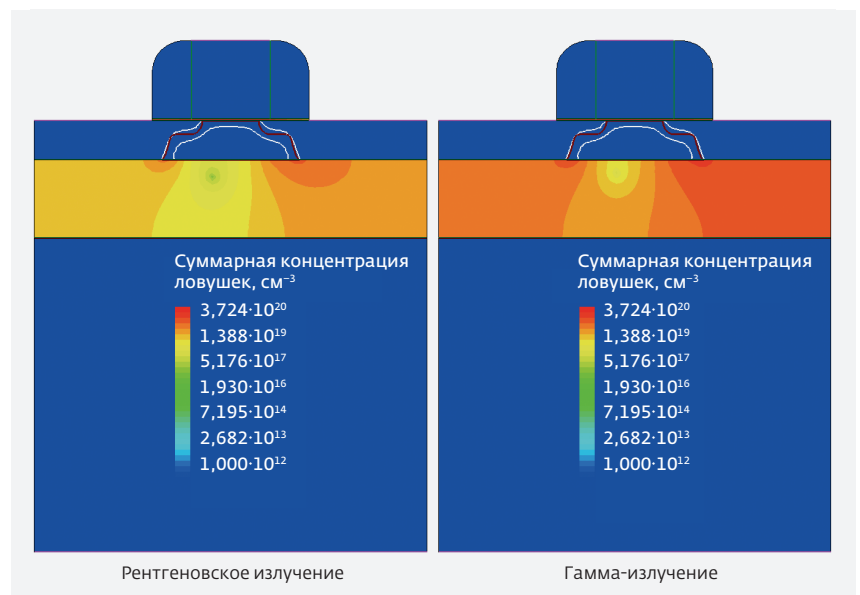
где  $G_{TID}$ ,  $G_{max}$  – пространственное распределение скорости генерации электронно-дырочных пар в соответствии с моделью TID и пиковое значение скорости генерации электронно-дырочных пар в объеме,

соответственно;  $D$  – доза радиации, накопленная прибором;  $a_{it}$  и  $b_{it}$  – подгоночные коэффициенты, значения которых варьируются в зависимости от типа транзистора.

Пространственно неоднородные профили распределения ловушек зависят от типа радиационного облучения. При одинаковых дозах облучения



**Рис.6.** Профиль скорости ударной ионизации, рассчитанный по модели TID для прибора, находящегося в рабочей точке



**Рис.7.** Конечные профили распределения дефектов в диоксиде кремния как результат рентгеновского (слева) и гамма-излучения (справа) для одинаковых доз облучения



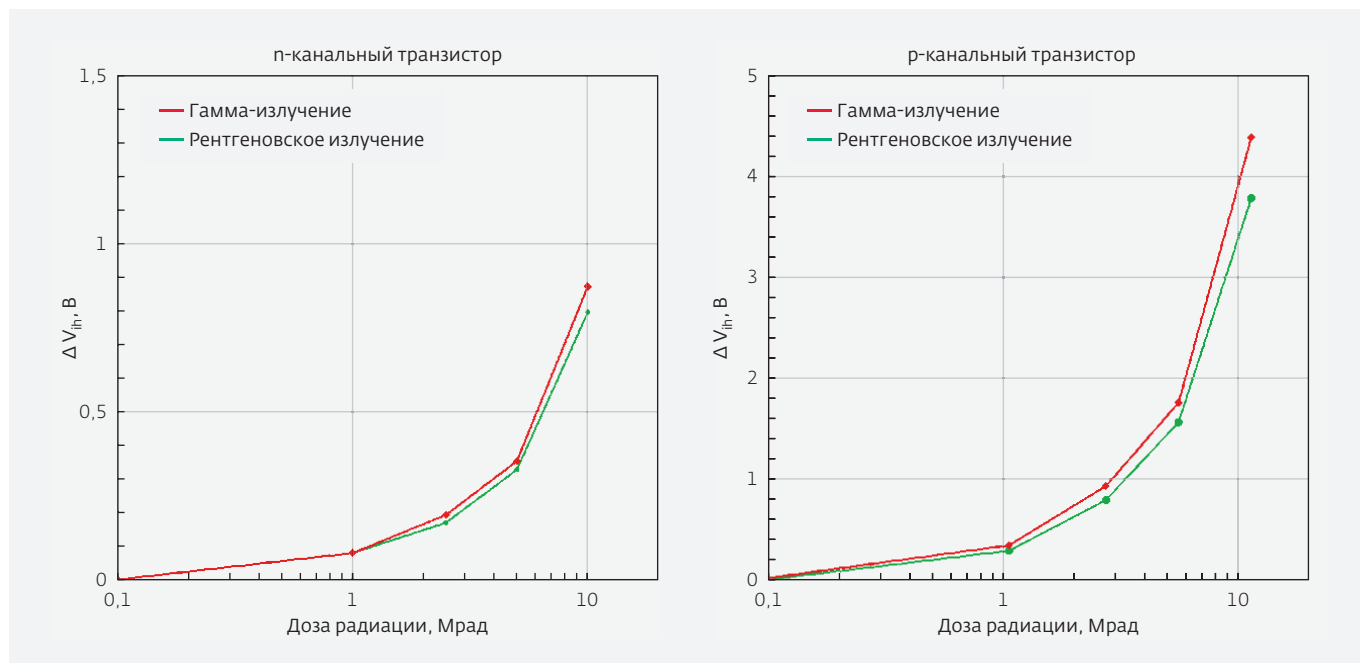


Рис.8. Сдвиг порогового напряжения в зависимости от дозы радиации под воздействием рентгеновского и гамма-излучений для n-канального транзистора (слева) и p-канального транзистора (справа).

гамма-радиация приводит к генерации большего количества дефектов в диэлектрике по сравнению с рентгеновским излучением (рис.7).

Согласно [5] ловушки, генерируемые в объеме диэлектрика, – донорного типа, в то время как на границе раздела кремний-диэлектрик генерируются оба типа ловушек – донорные и акцепторные. При рентгеновском и гамма-облучении сдвигаются пороговые напряжения n- и p-канальных КНИ МОП-транзисторов (рис.8). Из графиков видно,

что p-канальный транзистор проявляет меньшую устойчивость к полной ионизационной дозе (TID), чем n-канальный, что объясняется доминирующим влиянием ловушек донорного типа на функционирование прибора.

### "МЯГКИЙ" ОТКАЗ ЯЧЕЙКИ ПАМЯТИ SRAM ИЗ-ЗА ВОЗДЕЙСТВИЯ ОДИНОЧНОЙ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОЙ ЧАСТИЦЫ

Когда одиночная высокоэнергетическая частица проникает внутрь прибора, на пути ее следования генерируются неравновесные электронно-дырочные пары. Образованные избыточные заряды зачастую приводят к сбоям в работе приборов или участков схемы.

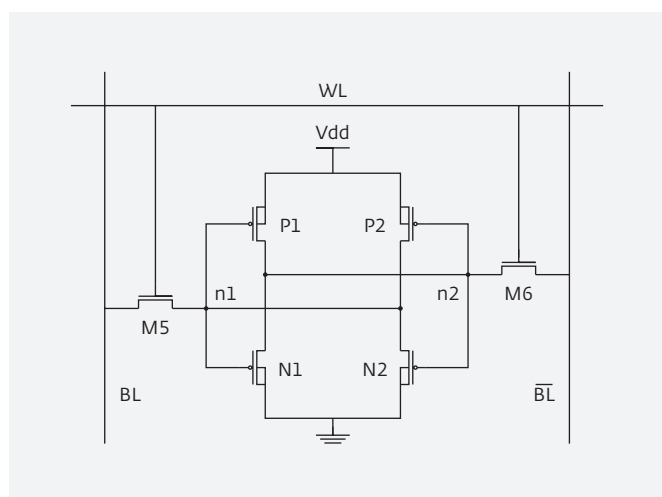


Рис.9. Схема шеститранзисторной КМОП-ячейки памяти SRAM

Весь мир СВЧ электроники **AVREX**  
www.AVREX.ru

**SPRAGUE GOODMAN**  
Подстроечные конденсаторы

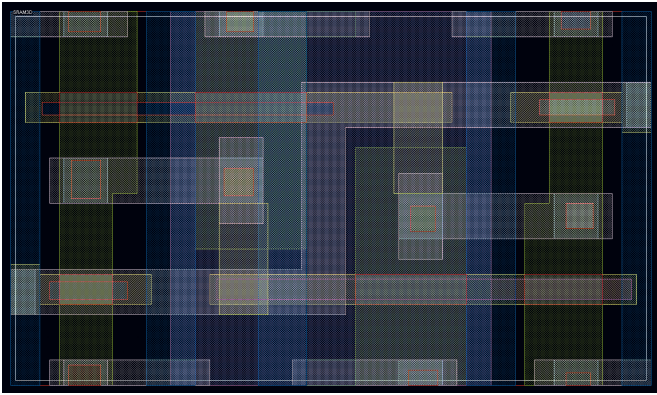
**PPI Passive Plus Inc.**  
RF & Microwave Components

**MICRO LAMBDA WIRELESS, INC.**  
ЖИГ-генераторы  
ЖИГ-фильтры  
Синтезаторы частоты

**eti**  
Компоненты и оборудование для систем связи

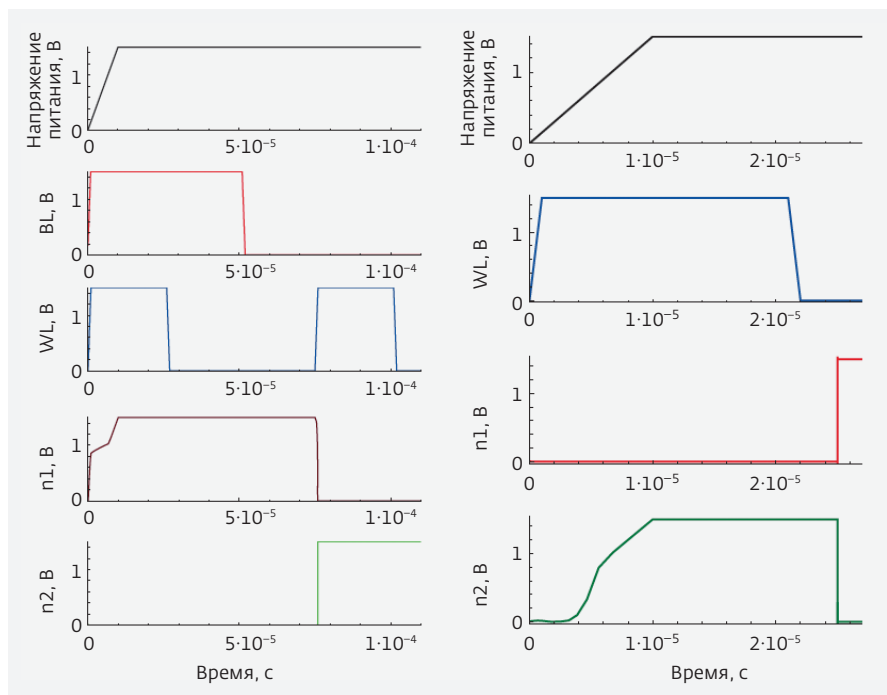
Высоковольтные высокочастотные керамические ЧИП-конденсаторы

**Официальный представитель в России**

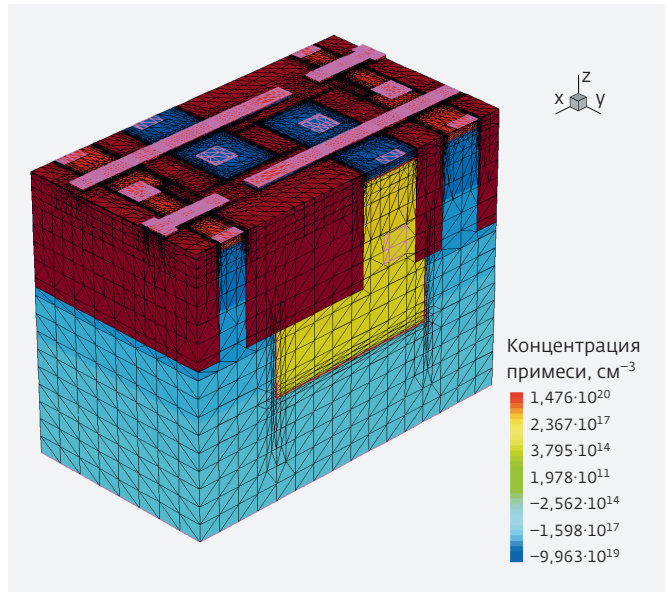


**Рис.10.** Топология шеститранзисторной КМОП-ячейки памяти SRAM, используемая для генерации 3D-структуры прибора

Рассмотрим пример воздействия частицы (тяжелого иона) на шеститранзисторную КМОП-ячейку памяти SRAM, вызывающего одиночный сбой (SEU) в работе ячейки в результате несанкционированного переключения из состояния "0" в состояние "1" [6]. Ячейка памяти SRAM (рис.9, 10) состоит из четырех транзисторов, которые образуют две перекрестные пары инверторов (N1-P1 и N2-P2), и двух управляющих транзисторов (M5 и M6). Узлы n1 и n2 представляют собой, соответственно, вход и выход ячейки памяти.



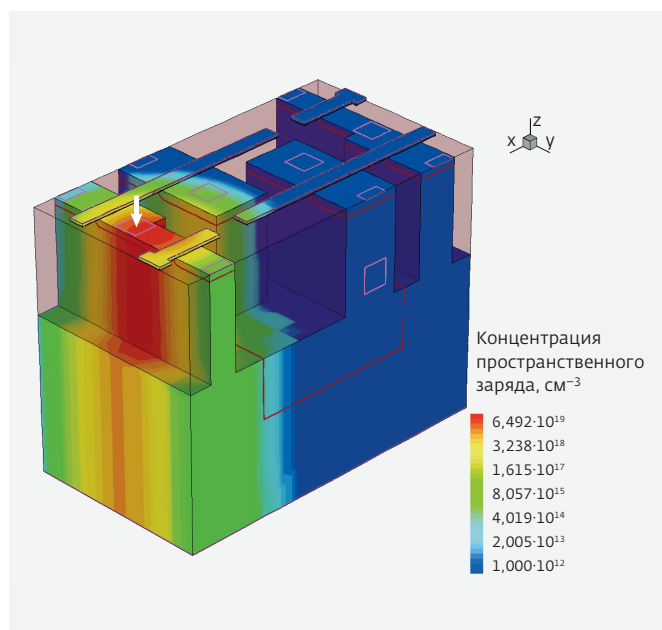
**Рис.12.** Временные диаграммы напряжений в узлах ячейки SRAM на первом (слева) и втором (справа) этапах моделирования



**Рис.11.** 3D-структура шеститранзисторной ячейки памяти SRAM с конечно-элементной сеткой, сгенерированной программой Sentaurus Mesh

Поведение шеститранзисторной ячейки памяти SRAM при взаимодействии с частицей следует рассматривать в трехмерном пространстве, поскольку частица может соударяться с прибором в произвольном месте и направлении. Поэтому ячейку представляют в виде трехмерного блока кремния вместе с соответствующими схематическими элементами (источниками напряжения и емкостями). Это обуславливает необходимость моделировать процесс ударной ионизации электронно-дырочных пар в результате проникновения частицы вглубь прибора с учетом растекания заряда в структуре прибора в смешанном режиме. В этом режиме прибор включают в состав схемы, которая, в свою очередь, моделируется на уровне SPICE-моделей.

Генерация 3D-структуры памяти SRAM производилась в редакторе Sentaurus Structure Editor. При этом на всех последовательных этапах моделирования структуры прибора использовалось описание масок из исходного топологического файла. Трехмерное распределение примеси задавалось



**Рис.13.** 3D-распределение пространственного заряда, обусловленное проникновением тяжелого иона в ячейку SRAM (стрелкой указано место соударения иона с прибором)

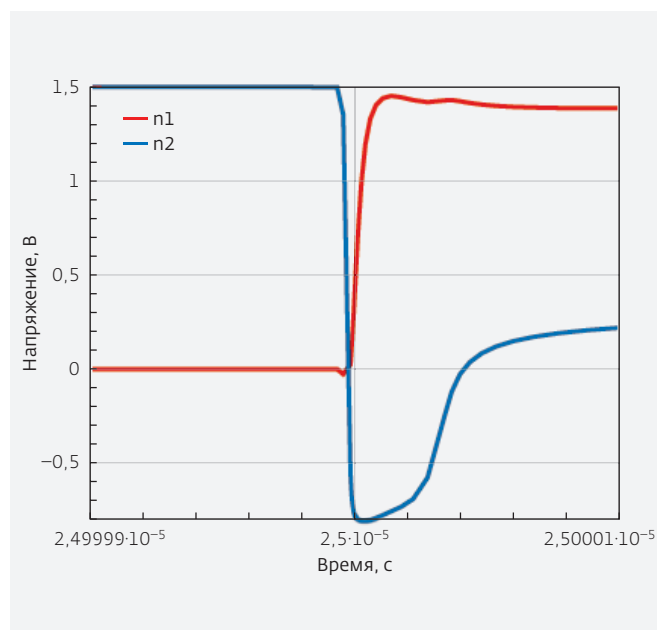
суперпозицией аналитически заданных одно- и двумерных профилей распределения примеси. После создания структуры ячейки выполнялась ее пространственная дискретизация путем генерации конечно-элементной сетки (рис.11).

Процесс приборного моделирования состоял из двух этапов (рис.12):

1. моделировалась запись в ячейку логической "1", после чего доступ к ячейке блокировался;
2. ячейка переводилась в состояние логического "0", затем доступ к ячейке закрывался, и она переводилась в состояние ожидания, после чего моделировалось соударение тяжелого иона с ячейкой.

Как только ячейка SRAM переводилась в состояние ожидания, инициировалось соударение тяжелого иона с ячейкой в районе стоковой области транзистора N1. Поглощение энергии иона в подложке вызывает генерацию избыточных неравновесных электронно-дырочных пар вдоль траектории проникновения частицы (рис.13).

Электроны и дырки, сгенерированные под воздействием тяжелого иона в окрестности стока транзистора N1, растекаясь, активируют паразитный тиристор, в результате чего сток и исток транзистора N1 закорачиваются. Это, в свою очередь, приводит к изменению напряжения в узле n1 с 0 до 1,5 В и инверсии напряжения на выходе ячейки (узел n2), что рассматривается как функциональный сбой ячейки (рис.14).



**Рис.14.** Изменение напряжений на входе/выходе ячейки SRAM в результате одиночного сбоя (SEU)

\* \* \*

Приборно-технологическое моделирование позволяет как качественно, так и количественно исследовать процессы в структуре полупроводниковых приборов, которые могут вызывать деградацию и возможный отказ. Обработка решений по радиационной и деградационной стойкости путем компьютерного моделирования дискретных приборов и фрагментов интегральных схем дает возможность существенно ускорить процесс проектирования и повысить надежность изделий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Sentaurus TCAD, Synopsys Inc. – <http://www.synopsys.com/Tools/TCAD>
2. **Bach S. et al.** Simulation of off-state degradation at high temperature in high voltage NMOS transistor with STI architecture. – ISPSD, 2010.
3. **Jin S. et al.** Gate current calculations using spherical harmonic expansion of Boltzmann equation. – SISPAD, 2009.
4. **Paillet P. et al.** Simulation of Multi-Level Radiation-Induced Charge Trapping and Thermally Activated Phenomena in SiO<sub>2</sub> // IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 45. No 3, June 1998.
5. **Fernández-Martínez P. et al.** Simulation of Total Ionising Dose in MOS capacitors. – Proceedings of the 8th Spanish Conference on Electron Devices, CDE'2011.
6. Sentaurus TCAD Newsletter, December, 2009.