

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН**

Горбунов Максим Сергеевич

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕМЕНТОВ КНИ КМОП СБИС
С ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТЬЮ
К ДОЗОВЫМ ЭФФЕКТАМ
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

**05.13.05 – «Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления»**

**05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на
квантовых эффектах»**

**Научный руководитель: к.т.н. Осипенко Павел Николаевич,
зав. ОРВТ НИИСИ РАН**

Введение

- К ИМС, предназначенным для функционирования в условиях действия факторов космического пространства, предъявляется ряд специфических требований: *малое энергопотребление, малые габаритные размеры, широкий диапазон рабочих температур, высокая радиационная стойкость*
- Можно выделить несколько фундаментальных задач радиационной стойкости к воздействию стационарного ионизирующего излучения, характерных для современных КМОП технологий:
 - сдвиг порогового напряжения;
 - деградация крутизны (подвижности) и подпорогового размаха передаточной характеристики;
 - токи утечки;
- Эти явления известны как эффекты полной дозы (Total Ionizing Dose (TID) Effects), имеют кумулятивный характер и связаны с накоплением заряда в изолирующих оксидах и поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO₂
- Для смешанных (аналого-цифровых) ИМС растёт роль разброса параметров элементов, усиленного воздействием ионизирующего излучения
- Существуют *технологические* и *конструктивно-топологические* методы повышения радиационной стойкости
- Одним из перспективных *технологических* направлений является развитие технологии «кремний на изоляторе» (КНИ)
- Необходимо исследовать эффективность существующих технологических и конструктивно-топологических методов и, при необходимости, разработать новые
- Разработчику требуется удобный инструмент моделирования, встроенный в стандартный маршрут проектирования и совместимый со стандартными коммерческими средствами САПР

Цель диссертации

- **Разработка методов и средств физического и схемотехнического моделирования работы ИМС, выполненных по современным КНИ КМОП технологиям, в условиях воздействия ИИ для различных электрических режимов**

Основные задачи

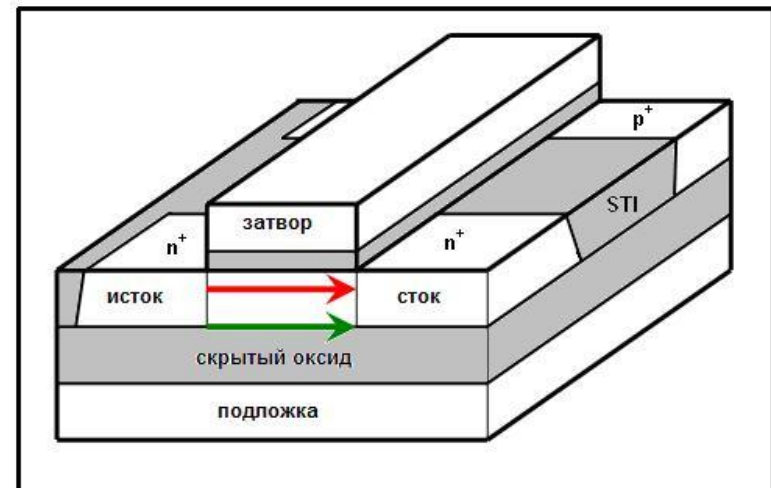
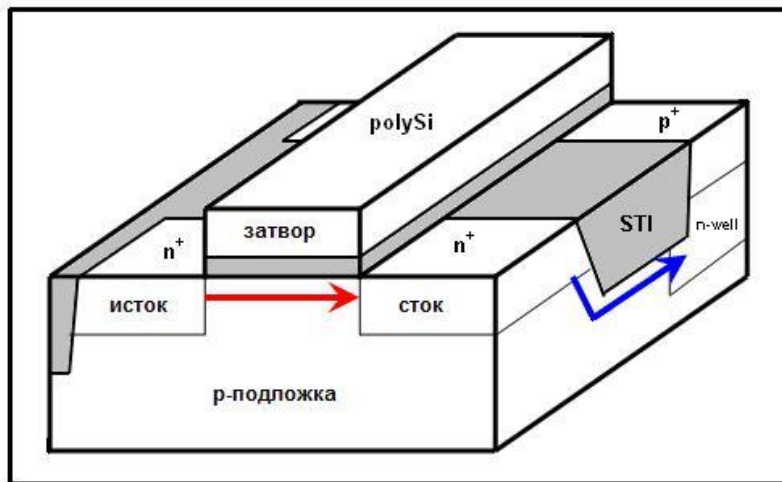
- *Разделение составляющих радиационно-индуцированной утечки*, позволяющее на основе анализа экспериментальных данных определить *направление оптимизации* с целью подавления этого эффекта.
- Разработка *аналитической модели*, позволяющей определить SPICE-параметры КНИ транзисторов, с учётом влияния контакта к телу.
- Исследование эффективности различных топологических вариантов реализации КНИ МОП-транзисторов в зависимости от геометрии канала и электрического режима при облучении.
- Разработка *схемотехнических методов моделирования* дозовых эффектов, в том числе радиационно-индуцированных токов утечки, в КНИ транзисторах и ИМС, изготовленных по КНИ КМОП технологии, с учётом электрического режима при облучении.
- Моделирование усиления разброса параметров транзисторов воздействием ионизирующего излучения.
- Разработка *программных средств, интегрированных в стандартный маршрут проектирования* и совместимых с современными коммерческими средствами САПР, позволяющих учитывать дозовые эффекты на этапе схемотехнического проектирования.

Основные положения, выносимые на защиту

- Разделение боковой и донной составляющих радиационно-индуцированных токов утечки в транзисторах показывает, что при разработке КНИ КМОП ИМС с повышенной стойкостью к дозовым эффектам *необходимо использовать транзисторы А- и Н-типа, при этом от других топологических вариантов можно полностью отказаться*
- *Аналитическая модель, позволяющая получить SPICE-параметры КНИ транзисторов А- и Н-типа и учесть влияние контактов к телу на характеристики.*
- *Метод схемотехнического моделирования дозовых эффектов в цифровых и аналоговых КМОП ИМС.*

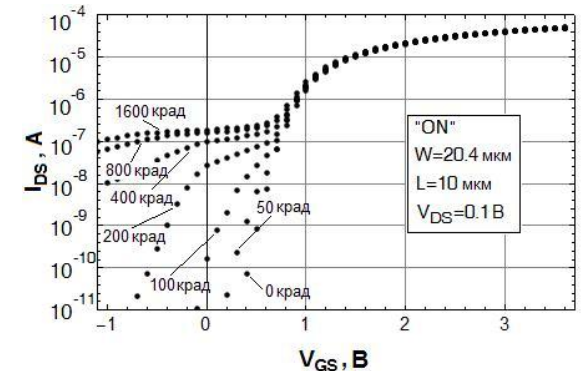
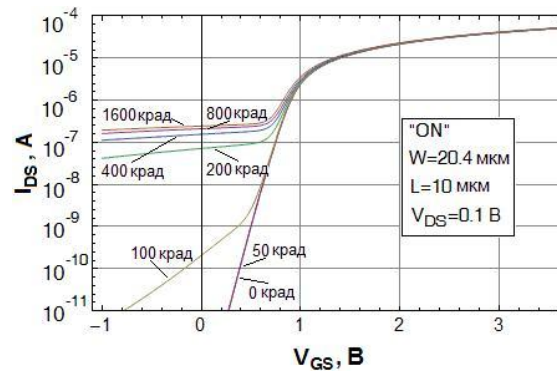
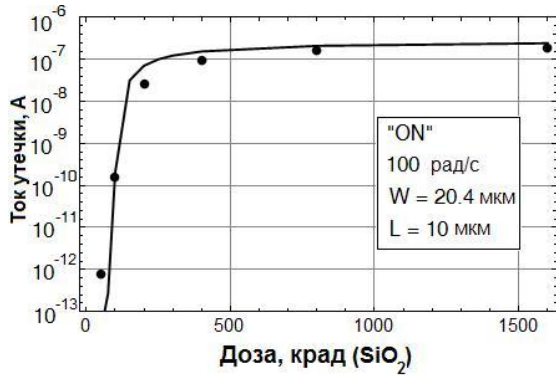
Разделение составляющих токов утечки в КНИ транзисторах

- *Радиационно-индуцированные токи утечки*, обусловленные встраиванием положительного заряда в слоях изоляции, являются наиболее значимой проблемой повышения радиационной стойкости современных субмикронных КМОП ИМС
- Для определения направления оптимизации техпроцесса и/или топологии, а также для получения параметров для моделирования необходимо разделить боковую и донную составляющие радиационно-индуцированных токов утечки в КМОП КНИ ИМС.
- Ток утечки (как боковой, так и донный) сильно зависит от электрического режима при облучении и от геометрии канала

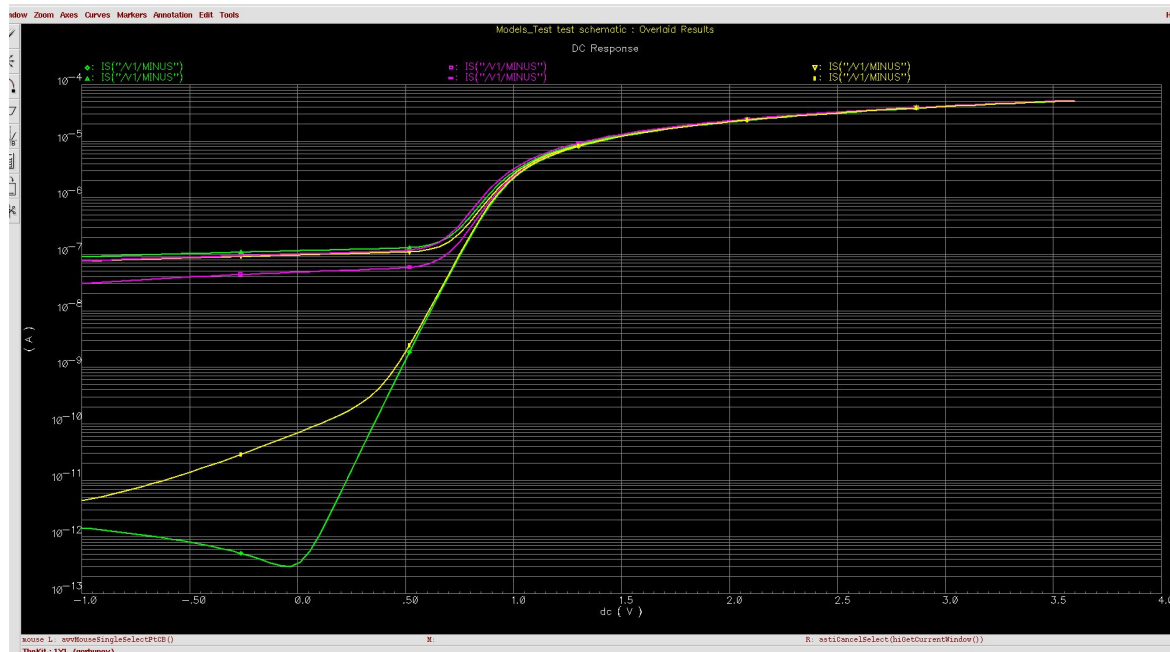


Сравнение с экспериментом

■ Физическая модель верифицирована по экспериментальным данным 0,5 мкм КНИ КМОП технологии. Исследования проводились в НИИСИ РАН, РИЦ «Курчатовский институт», НИИП, ЭНПО «СПЭЛС»



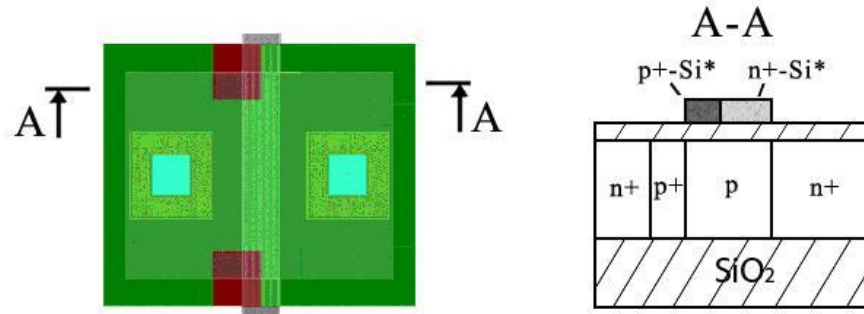
■ Моделирование в САПР фирмы Cadence:



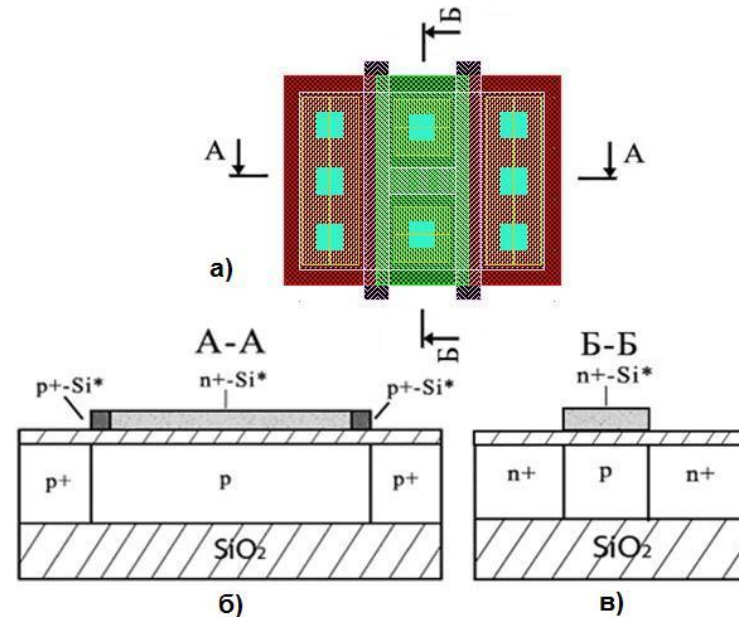
КНИ транзисторы с контактом к телу

- 2 основных варианта топологической реализации контактов к телу: с жёсткой привязкой тела (**А-тип**) к истоку и с возможностью произвольной коммутации тела (**Н-тип**)

- А-тип:**

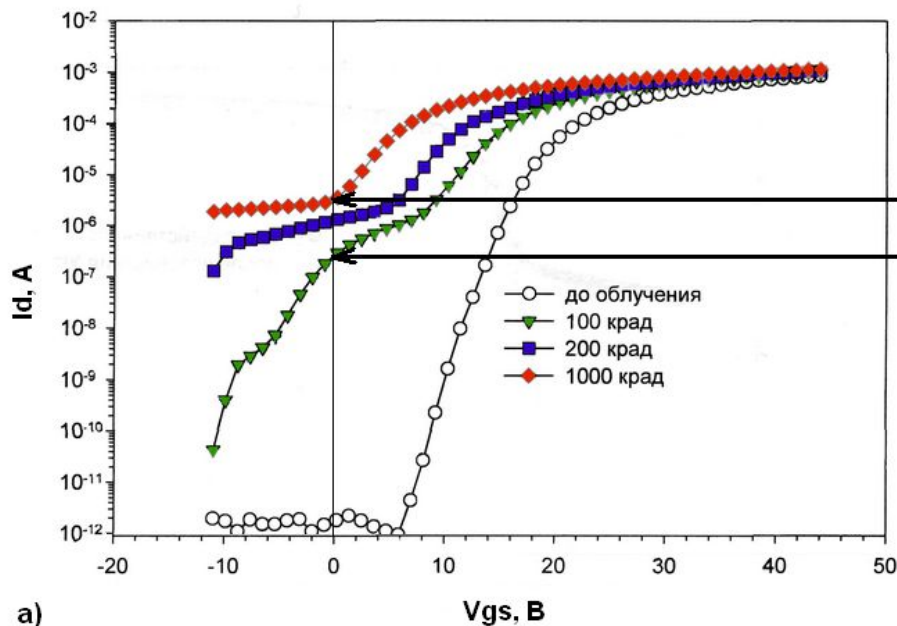


- Н-тип:**

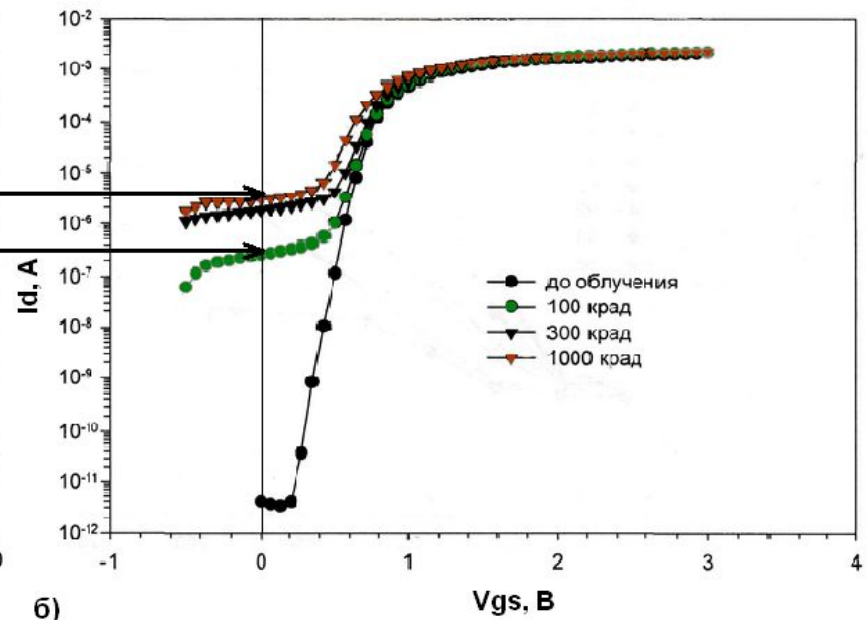


Преобладание боковой утечки

- На рисунке представлены экспериментальные ВАХ n-канальных 0,5 мкм КНИ транзисторов (технологическая линия НИИСИ РАН) F-типа до и после облучения.
- Излом присутствует как на ВАХ верхнего транзистора, так и на ВАХ нижнего, что свидетельствует о том, что доминирует боковая утечка



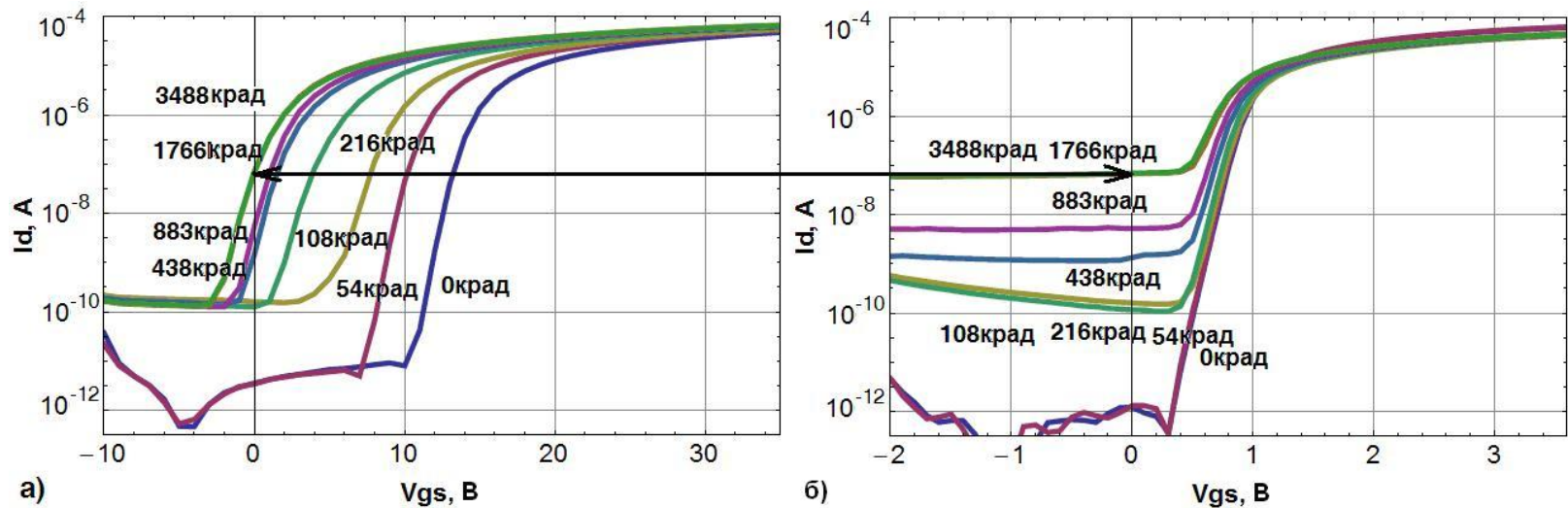
a)



b)

Преобладание донной утечки

- На рисунке представлены экспериментальные ВАХ n-канальных 0,5 мкм КНИ транзисторов (технологическая линия НИИСИ РАН) N-типа до и после облучения.
- Излом присутствует только на ВАХ верхнего транзистора, что свидетельствует о том, что доминирует донная утечка

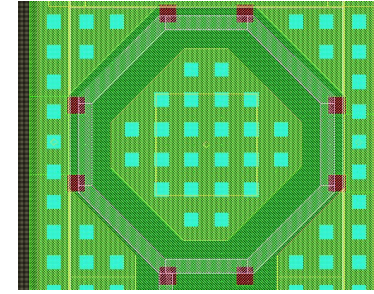
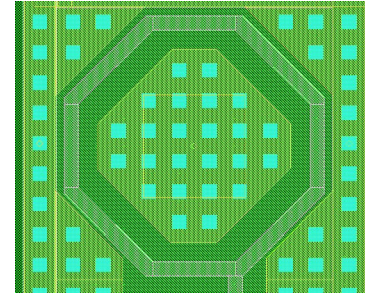
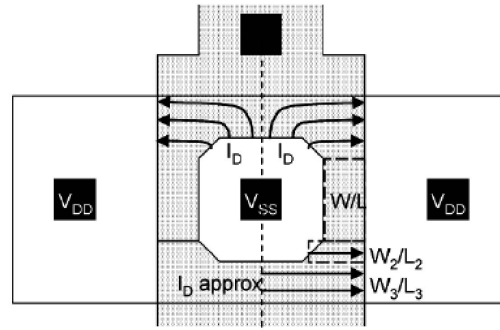
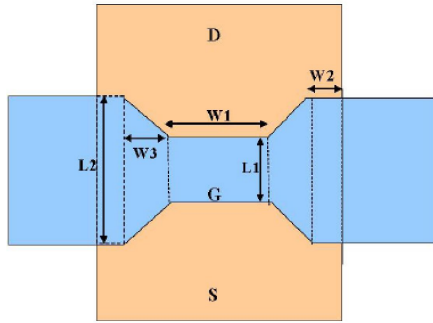


- Для А-транзисторов результаты аналогичные.

Анализ влияния режима при облучении на стойкость приборов с различными вариантами топологической реализации

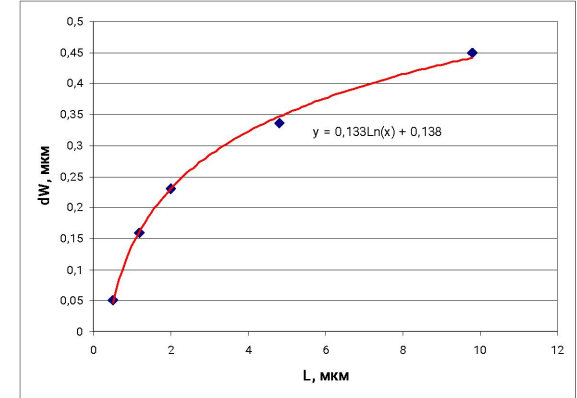
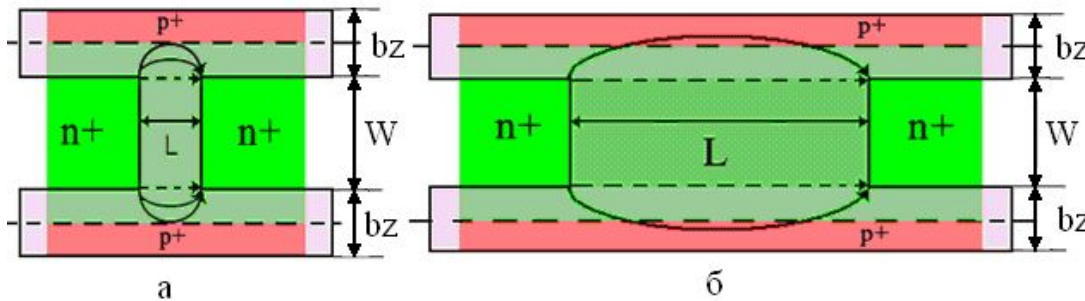
- В транзисторах с плавающим телом преобладает **боковая утечка**. **Донная утечка** преобладает в А-, Н- и кольцевых транзисторах и проявляется при значениях накопленной дозы 1-2 Мрад (Si)
- В тестовых транзисторах с коротким каналом донная утечка появляется раньше, чем в транзисторах с длинным каналом
- При проектировании **определение длины канала транзистора обуславливается компромиссом между радиационной стойкостью (увеличение длины канала препятствует возникновению донной утечки), занимаемой площадью и производительностью ИМС**
- Транзисторы А-типа являются **наиболее предпочтительным топологическим вариантом** при проектировании радиационно-стойких ИМС
- Применение транзисторов Н-типа ограничено случаями, когда тело должно быть независимо от истока (ключи, схемы ввода/вывода и т.п.)

Сравнение с другими топологическими вариантами



- «Собачья кость»
 - «Окружённый исток»
 - Кольцевая топология
- В транзисторах нестандартной топологии возникают проблемы определения эффективной ширины и длины канала
 - Наиболее эффективными методами борьбы с радиационно-индуцированной утечкой являются кольцевая топология и топология транзистора с окружённым истоком/стоком.
 - Топологические варианты, используемые в объёмной КМОП технологии, не имеют преимущества перед топологическими вариантами, используемыми в КНИ КМОП технологии.
 - Кольцевая топология занимает большую площадь при малых соотношениях W/L
 - В КНИ КМОП ИМС от этих топологических вариантов можно полностью отказаться в пользу А- и Н-транзисторов

Эффективная ширина канала транзистора Н-типа



■ Существуют «паразитные» пути протекания тока

■ Эффективная ширина канала W_{eff} отличается от ширины задаваемой «средней» частью Н-образного затвора

■ Различие между W_{eff} и W можно учесть с помощью сравнения крутизны (подвижности) Н-транзисторов с одинаковой длиной и разной шириной. При этом транзистор с наибольшей шириной является «опорным», т.к. при значениях ширины канала много большей суммарной ширины «боковых затворов» ($W \gg 1$ мкм) влиянием паразитных областей можно пренебречь:

■ Крутизна $g_m = \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} = \mu \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L} V_{ds}$ ■ Поправка: $\Delta W = \frac{W_0 \cdot g_{mH}}{g_{mH0}} - W$

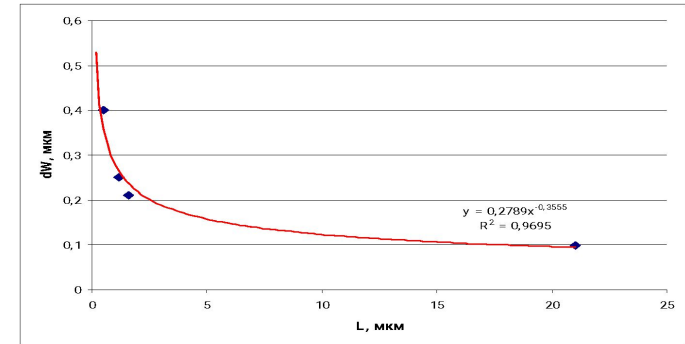
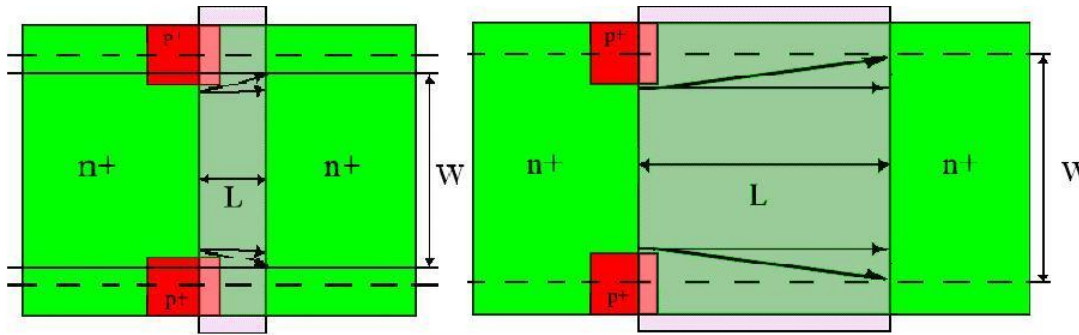
■ W, g_{mH} – ширина и крутизна транзистора, для которого считается поправка;

■ W_0, g_{mH0} – ширина и крутизна «опорного» транзистора

■ Для нахождения **зависимости поправки от длины канала** производится усреднения величины поправки для транзисторов с одинаковой длиной.

$$\Delta W = 0,133 \cdot \ln(L[\mu\text{m}] / 10^{-6}[\mu\text{m}]) + 0,138$$

Эффективная ширина канала транзистора А-типа



Эффективная ширина канала отличается от топологических значений ширины затвора, причём вносимые поправки в эффективную ширину зависят от длины канала: чем больше длина, тем меньше значение поправки

Поправка для А-транзистора находится по формуле:

$$\Delta W = W - \frac{W_0 \cdot g_{mA}}{g_{mA0}}$$

- W, g_{mA} - ширины и крутизна транзистора, для которого считается поправка
- W_0, g_{mA0} - ширина и крутизна «опорного» транзистора
- **Зависимость поправки от длины канала:**

$$\Delta W = 0.2979 \cdot (L[\mu\text{m}] / 10^{-6}[\mu\text{m}])^{-0,3839}$$

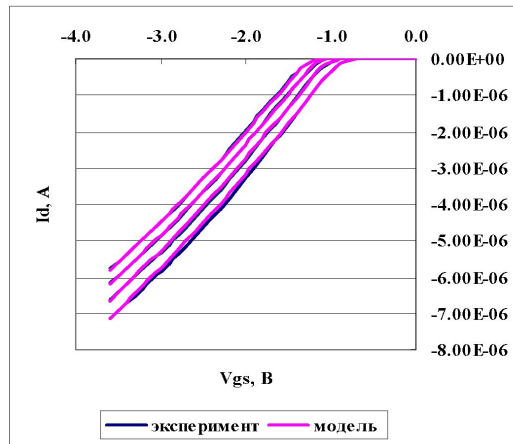
Активные области Н- и А-транзисторов практически не отличаются друг от друга, поэтому для модели А-транзисторов можно использовать некоторые параметры, полученные для Н-транзисторов

Апробация модели

Предложенный метод был успешно опробован на технологиях 0,35 мкм и 0,5 мкм КНИ КМОП технологической линии НИИСИ РАН. Результаты сравнения измеренной частоты кольцевых генераторов (на транзисторах А- и Н-типа) с результатами моделирования показывают, что ошибка при моделировании не превышает 10-15%, что является достаточным для большинства цифровых ИМС.

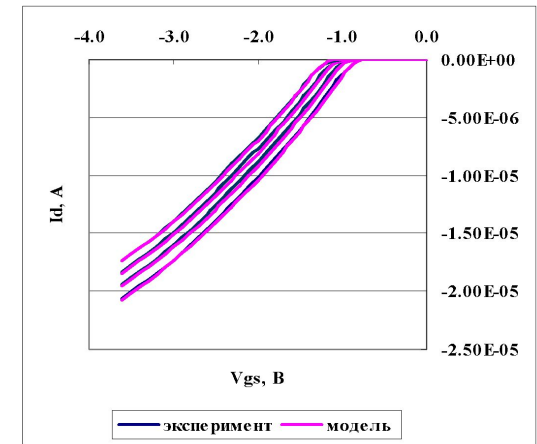
Н-тип:

- длинный канал
- большая ширина



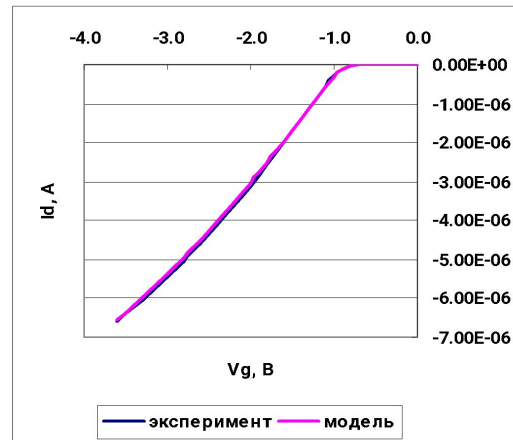
Н-тип:

- короткий канал
- малая ширина



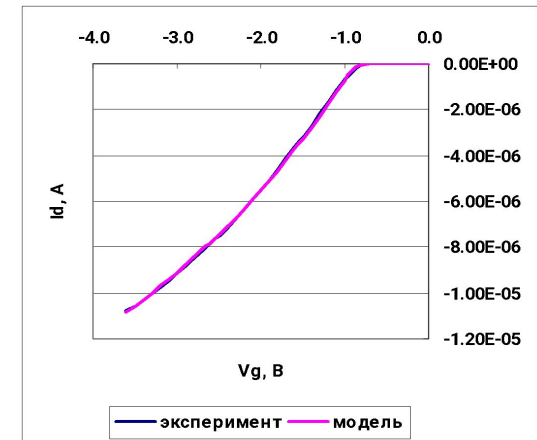
А-тип:

- длинный канал
- большая ширина



А-тип:

- короткий канал
- малая ширина



Схемотехническое моделирование дозовых эффектов в цифровых и аналоговых КМОП ИМС

- Дозовые зависимости обычно получаются из данных по радиационным испытаниям чипа в целом. Главным недостатком этих инструментов является *практическая невозможность учёта зависимости радиационной деградации от электрического режима при облучении*
- Требуется перенести дозовые зависимости в SPICE-модели
- Встраивание физической модели в стандартную программу-симулятор невозможно
- Ключевым пунктом предлагаемой методологии является интеграция физической модели со SPICE-моделью, реализованной на языке описания аппаратуры HDL
- **Метод предполагает использование физической модели, встроенной в описание компактной модели транзистора **BSIM3v3**, описанной на языке **Verilog-A****
- Создано программное средство, встроенное в САПР
- Методика успешно применена для источника опорного напряжения, кольцевых генераторов и операционного усилителя

Режимы моделирования

Предусмотрено 2 режима моделирования:

- 1) Полагается, что все транзисторы в схеме облучаются в одном режиме, устанавливаемом параметром “vgirr”.
- 2) Для каждого транзистора электрический режим при облучении устанавливается первой точкой анализа: начальным значением напряжения при анализе по постоянному току (DC-анализе), значением напряжения при $t=0$ при анализе во временной области (transient) или значением рабочей точки в малосигнальном анализе (AC-анализе).

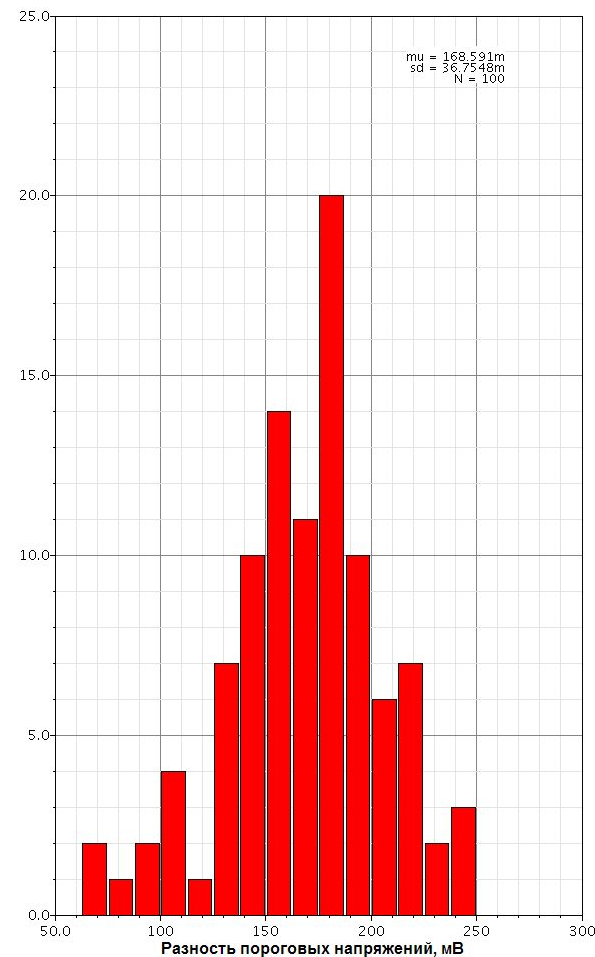
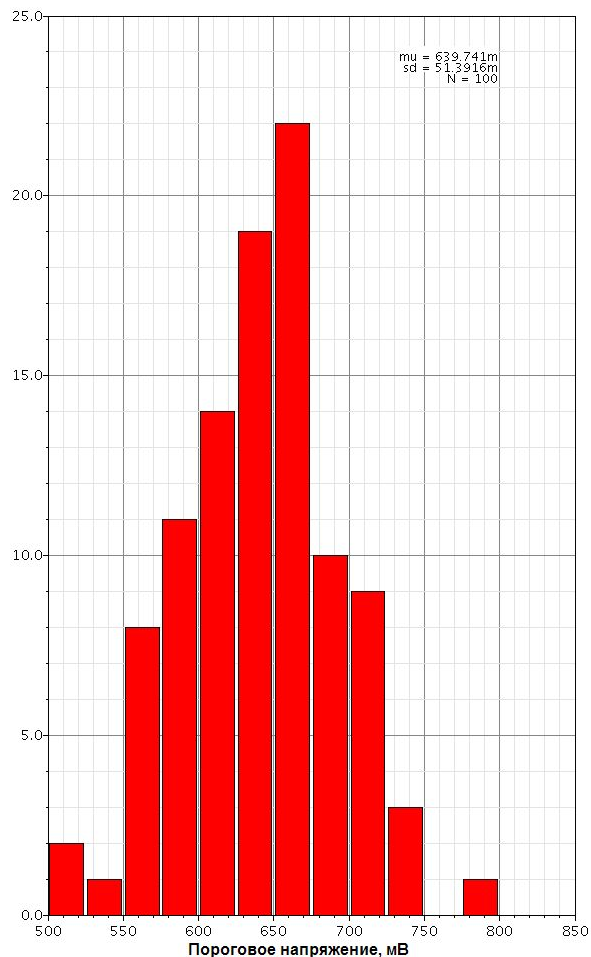
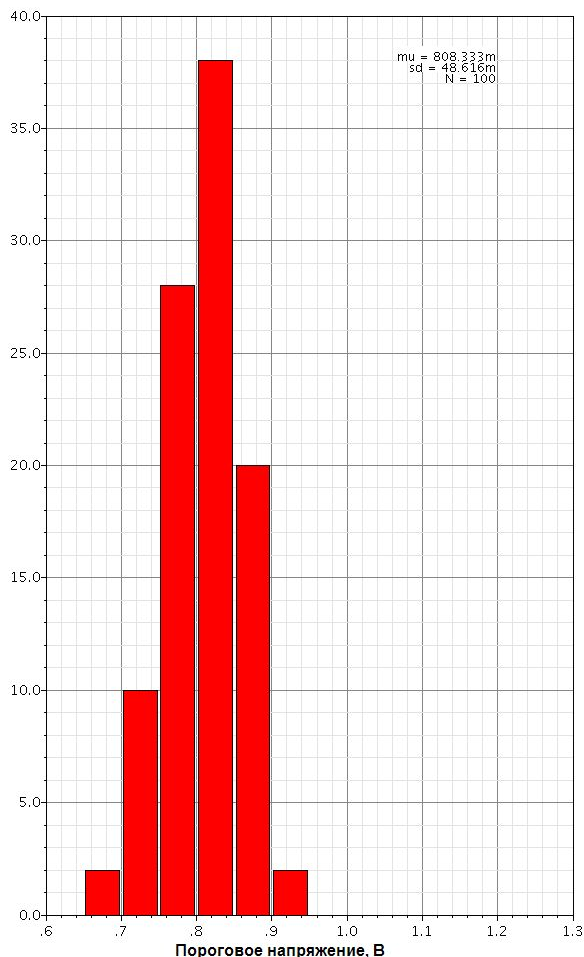
Первый режим используется при калибровке параметров физической модели по экспериментальным дозовым зависимостям и ВАХ. Рекомендуется для проведения DC-анализа

Второй режим является основным и используется для оценки радиационной стойкости ИМС различной сложности

Важным преимуществом данного метода является то, что в схеме не производится никаких изменений

```
inline subckt nmos_tn ( d g s b )
parameters w=1E-7 l=1E-7 as=0 ad=0 ps=0 pd=0 nrd=0 nrs=0
...
nmos_tn (d g s b) bsim3mos_rad W=w L=l AD=ad AS=as PD=pd PS=ps NRD=nrd NRS=nrs DOSE=dose RADMODE=radmode
VGIRR=vgirr
+ TYPE=1
+ LMIN=1.8E-007          LMAX=3.5E-007          WMIN=2.2E-007
+ WMAX=6E-007           VERSION=3.3          MOBMOD=1
...
ends nmos_tn
```

Радиационно-индуцированный разброс параметров



- 2 транзистора (0,18 мкм КМОП, толстый оксид) в разных электрических режимах при облучении (доза 2,5 Мрад (Si))
- Значения медианы распределения порогового напряжения отличаются на 170 мВ («номинальный» сдвиг порогового напряжения)
- Из-за технологического разброса параметров и различных режимов разность пороговых напряжений может достигать до 250 мВ (радиационно-индуцированный разброс параметров)

Научная новизна и практическая значимость

- Определены наиболее эффективные (с точки зрения *функционального назначения элемента*) топологические методы борьбы с дозовыми эффектами в КНИ КМОП СБИС
- Выявлены **наихудшие электрические режимы** при облучении, в зависимости от геометрии канала и от особенностей создания контактов к телу КНИ транзистора
- Предложен новый **метод экстракции SPICE-параметров** КНИ транзисторов А- и Н-типа
- Предложен *метод* и разработано *программное средство* для *схемотехнического моделирования эффектов полной дозы* на уровне ИМС, *учитывающий электрический режим* при облучении каждого составляющего ИМС транзистора в широком диапазоне значений накопленной дозы.
- Учёт электрического режима для каждого составляющего ИМС элемента позволяет выявлять **входные вектора «наихудшего случая» для библиотеки элементов** и проводить моделирование усиления разброса параметров элементов, вызванного радиационным воздействием
- В работе рассмотрены результаты моделирования эффектов полной дозы для *кольцевых генераторов, операционного усилителя и источника опорного напряжения*
- Предложенные методы позволяют проводить **сравнение эффективности схемотехнических решений**
- Все предложенные методы и программные средства **интегрированы в стандартный маршрут проектирования** и поддерживаются современными коммерческими САПР

Внедрение результатов

- Результаты работы использованы при выполнении ОКР «Стойкость», «Квартал» и «Перга» в НИИСИ РАН

Спасибо за внимание!