НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

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

- 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 SPICEпараметры 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 радиационноиндуцированных 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, РНЦ «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-А

∎ А-тип:



Н-тип:

Преобладание боковой утечки

- На рисунке представлены экспериментальные ВАХ п-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



Преобладание донной утечки

- На рисунке представлены экспериментальные ВАХ п-канальных 0,5 мкм КНИ транзисторов (технологическая линия НИИСИ РАН) Н-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 Weff отличается от ширины задаваемой «средней» частью Н-образного затвора
- Различие между Weff 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>>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;
- W₀, g_{mH0} ширина и крутизна «опорного» транзистора
- Для нахождения зависимости поправки от длины канала производится усреднения величины поправки для транзисторов с одинаковой длиной.

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

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*, _{атА} ширины и крутизна транзистора, для которого считается поправка
- *W*₀, *g*_{*mA0*} ширина и крутизна «опорного» транзистора
- Зависимость поправки от длины канала:

 $\Delta W = 0.2979 \cdot (L[M]/10^{-6}[M])^{-0.3839}$

 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.

П



15

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=I 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 Нтипа
- 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!