

Компактная SPICE-модель КНИ МОП-транзистора для проектирования спецстойких СБИС с проектными нормами 0.35 мкм

А.С. Мокеев, С.В. Карачкин

ФГУП «ФНПЦ НИИС им. Ю.Е. Седакова», aYatmanov@niiis.nnov.ru

Аннотация — В статье описаны способы и алгоритм модификации стандартной компактной SPICE-модели КНИ МОПТ BSIMSOI3.2 для учета стационарного и импульсного воздействия ионизирующего излучения. Выполнена экстракция радиационных параметров модифицированной SPICE-модели КНИ n-МОПТ. Проведено схемотехническое моделирование оценочной СБИС с использованием разработанных SPICE-моделей.

Ключевые слова — SPICE-модель, радиационные эффекты, СБИС, ионизирующее излучение, КНИ МОПТ, экстракция параметров.

I. ВВЕДЕНИЕ

К электронной аппаратуре специального назначения, работающей в условиях жесткого ионизирующего излучения (ИИ), предъявляются требования по безотказной работе при воздействии спецфакторов. Поэтому при разработке и изготовлении спецстойких СБИС встает острая необходимость в оценке уровня их стойкости к воздействию спецфакторов (СФ) на этапе моделирования электрической схемы. Анализ стандартных SPICE-моделей, предоставляемых коммерческими САПР (Cadence, ADS и т.д.), показал, что они не позволяют моделировать радиационные эффекты в элементах СБИС, возникающие при воздействии спецфакторов. Для решения задач по проектированию и изготовлению спецстойкой электронной компонентной базы разработка схемотехнических моделей элементов СБИС с учетом радиационных эффектов является актуальной. Применение таких моделей значительно сократит сроки и повысит качество процесса проектирования спецстойких СБИС.

II. МОДИФИКАЦИЯ СТАНДАРТНОЙ SPICE-МОДЕЛИ МОП КНИ ТРАНЗИСТОРА BSIMSOI3.2

A. Способы модификации SPICE-моделей

Анализ структуры SPICE-моделей, их назначения, предъявляемых к ним требований, а также принципов их построения и функционирования в программной среде проектирования СБИС с применением САПР показал, что для модификации стандартных SPICE-моделей элементов могут быть использованы три основных подхода:

1) изменение программного кода модели;

2) формирование макромодели;

3) изменение модели на уровне синтаксиса программы-симулятора.

В данной работе для учета радиационных эффектов в SPICE-модели КНИ МОПТ использован второй и третий подход.

B. Алгоритм модификации SPICE-модели

1) Выбирается стандартная SPICE-модель элемента СБИС, поддерживаемая программой-симулятором.

2) Формируется макромодель.

3) В net-лист макромодели в качестве дополнительного параметра устройства вводится пользовательский параметр характеристики СФ (доза, мощность дозы ИИ).

4) Проводятся исследования электрофизических характеристик (ЭФХ) тестовых структур в нормальных условиях (НУ) и в условиях воздействия СФ.

5) Проводится анализ полученных ЭФХ, определяются зависимости отдельных параметров макромодели от характеристики СФ.

6) Выбираются аппроксимирующие функции для данных зависимостей.

7) В net-листе радиационно-зависимые параметры макромодели выражаются через аппроксимирующие функции, а их коэффициенты вводятся в качестве дополнительных радиационных параметров.

C. Эффекты суммарной накопленной дозы ИИ

Для учета деградации характеристик КНИ МОПТ при данном спецвоздействии необходимо определить и включить в net-лист модели функциональные зависимости следующих параметров:

– для сдвига порогового напряжения:

$$V_{th0} = f_{V_{th0}}(D), V_{OFF} = f_{V_{OFF}}(D);$$

– для спада подвижности носителей заряда в канале:

$$U_0 = f_{U_0}(D), U_A = f_{U_A}(D), U_B = f_{U_B}(D);$$

– для уменьшения наклона подпорогового участка входной ВАХ:

$$CIT = f_{CIT}(D);$$

– для паразитных токов утечки:

$$ISREC = f_{ISREC}(D),$$

где D – суммарная накопленная доза ИИ.

Возникающие в КНИ n-МОПТ утечки по нижней и боковым граням кремниевого островка описываются (в случае использования макромоделей) дополнительными моделями МОП-транзисторов (MOS3) с параметрами VTO и $U0$ [1]. В данной работе для учета паразитных токов утечек используется радиационно-зависимый параметр поверхностных состояний $ISREC$. Уменьшение количества компонентов макромоделей КНИ МОПТ позволит снизить время моделирования элемента и всей схемы в целом.

D. Эффекты импульсного воздействия ИИ

Переходные радиационные эффекты при импульсном воздействии ИИ с большой мощностью дозы связаны с ионизацией полупроводника и протеканием дополнительных фототоков через рабочую область транзистора. Носители, сгенерированные в p-n переходе, разделяются электрическим полем перехода и дают всплеск тока непосредственно в момент импульса. Для моделирования этого эффекта SPICE-модель КНИ МОПТ дополнена двумя источниками тока (ISOURCE) [2]. Считается, что при данном спецвоздействии изменяются только параметры этих источников. Необходимо определить и включить в net-лист макромоделей функциональную зависимость параметра модели (ISOURCE)

$$VAL1 = f_{VAL1}(DR),$$

где $VAL1$ – ток высокого уровня импульсной формы сигнала, DR – мощность дозы ИИ.

III. ЭКСТРАКЦИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ МОДИФИЦИРОВАННОЙ SPICE-МОДЕЛИ МОП КНИ ТРАНЗИСТОРА

Экстракция SPICE-параметров – это процесс идентификации (получения) SPICE-параметров модели электронного устройства из набора данных о его электрофизических характеристиках с помощью прикладных программ, использующих алгоритмы математического и статистического анализа.

Исходными данными для экстракции SPICE-параметров являются:

- параметры технологического процесса;
- топологические параметры устройства;
- ЭФХ тестовых структур (НУ, спецвоздействие);
- требования к САПР, программе-симулятору, стандартным SPICE-моделям устройств [3].

Одной из главных проблем проектирования СБИС, устойчивых к радиационному воздействию, является

значительная стоимость и продолжительность натуральных испытаний. Особенно это касается испытаний разработанных вариантов микросхем для исследования эффективности различных конструктивно-технологических и схмотехнических решений, повышающих спецстойкость. Поэтому значительный интерес представляет моделирование радиационных эффектов на ЭВМ с помощью пакетов САПР. В рамках данной работы проведен анализ методов моделирования радиационных эффектов средствами САПР Sentaurus TCAD. Разработаны методики и проведена модификация стандартных моделей САПР TCAD Synopsys для учета следующих зависимостей

- деградации подвижности носителей заряда от дозы ИИ;
- генерации поверхностных состояний на границах раздела Si – SiO₂ от дозы ИИ;
- зависимости генерации носителей заряда в объеме полупроводника от мощности дозы ИИ [4].

Средствами САПР Synopsys TCAD проведено приборно-технологическое моделирование (ПТМ) маршрута изготовления КМОП КНИ СБИС с проектными нормами 0.35 мкм. Получены структуры (рис. 1) и ЭФХ КНИ МОПТ А-типа с учетом стационарного и импульсного воздействия ИИ. Выбранные значения дозы ИИ в относительных единицах (D/D_{max}): 0, 0.2, 0.4, 0.6, 1; значения мощности дозы ИИ (DR/DR_{max}): 0.1, 0.13, 0.33, 0.66, 1. Длительность импульса ИИ 15 нс. Топологические параметры КНИ МОПТ приведены в табл. 1.

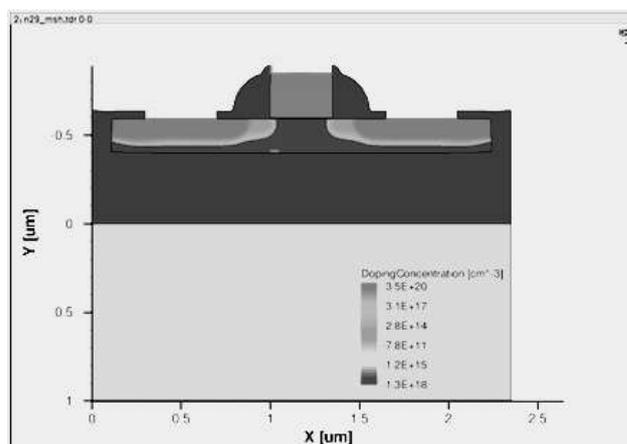


Рис. 1. Структура МОП КНИ транзистора

Таблица 1

Топологические параметры КНИ МОПТ А-типа

Ширина канала W, мкм	Длина канала L, мкм
0.8 ÷ 3.5	0.35 ÷ 3.5

Экстракция SPICE-параметров КНИ МОПТ проводилась с помощью САПР Agilent IC-CAP 2010.08 с внешне подключенным симулятором (программой моделирования) Spectre фирмы Cadence на рабочих станциях с ОС Linux. DC, AC и температурные параметры извлекаются с помощью оптимизационных

алгоритмов САПР IC-CAP и программ на языке PEL (Parameter Extraction Language). Радиационные параметры извлекаются путем аппроксимации зависимостей модельных параметров от характеристики СФ. В результате анализа ЭФХ МОПТ, полученных при различных значениях дозы и мощности дозы ИИ, определены следующие зависимости параметров модифицированной SPICE-модели от характеристик СФ:

$$VTH0 = A + B * e^{-\frac{D}{c}},$$

$$ISREC = F1 + \frac{(F2 - F1)}{(1 + 10^{F4*(F3-D)})}$$

$$I1.VAL1 = IMP1 * DR,$$

$$I2.VAL1 = \frac{IMP2 * DR}{P1 + DR}.$$

Извлеченные радиационные параметры модифицированной SPICE-модели КНИ n-МОПТ А-типа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Радиационные параметры модифицированной SPICE-модели КНИ n-МОПТ А-типа

Параметр	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>
Значение	-94.8x10 ⁻³	7.2x10 ⁶	0.698	11.3x10 ⁻⁶
Параметр	<i>P1</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Значение	1x10 ⁻¹⁵	0.461	0.228	0.184
Параметр	<i>IMP1</i>	<i>IMP2</i>		
Значение	4.92x10 ⁻⁶	2.4x10 ⁻³		

На рис. 2-5 представлены ЭФХ КНИ n-МОПТ А-типа с топологическими размерами W/L=3.5мкм/0.35мкм. Маркерами обозначены результаты ПТМ, сплошной линией – результаты моделирования с использованием экстрагированных SPICE-параметров.

Относительная погрешность моделирования входных ВАХ КНИ МОПТ при стационарном воздействии ИИ составила 20% и 40% в надпороговой и подпороговой области, соответственно; выходных ВАХ – 4%. Погрешность моделирования всплеска тока стока при импульсном воздействии ИИ составила 11%.

В табл. 3 приведены результаты сравнения временных затрат на моделирование входной ВАХ (94 точки) КНИ n-МОПТ А-типа (W/L=3.5мкм/0.35мкм). Используются три варианта модели: стандартная BSIMSOI3.2; BSIMSOI3.2 с источниками тока и радиационными параметрами; BSIMSOI3.2 с источниками тока, радиационными параметрами и дополнительным МОПТ (MOS3) для описания паразитных токов утечки. Моделирование проводилось с использованием ПК (Intel Core2 2.4 ГГц

и 2 ГБ ОЗУ) в САПР Cadence v.5.1.41, программа-симулятор – Spectre v.10.1.1.029.

Таблица 3

Время моделирования (Т) ВАХ КНИ n-МОПТ А-типа (W/L=3.5мкм/0.35мкм) для стандартной и модифицированной модели BSIMSOI3.2

Вариант SPICE-модели	D/D _{max}	T, мс
BSIMSOI3.2	-	12.06
BSIMSOI3.2 + источники тока + радиационные параметры	0	12.46
	1	13.99
BSIMSOI3.2 + источники тока + радиационные параметры + дополнительный МОПТ (MOS3)	0	15.06
	1	15.92

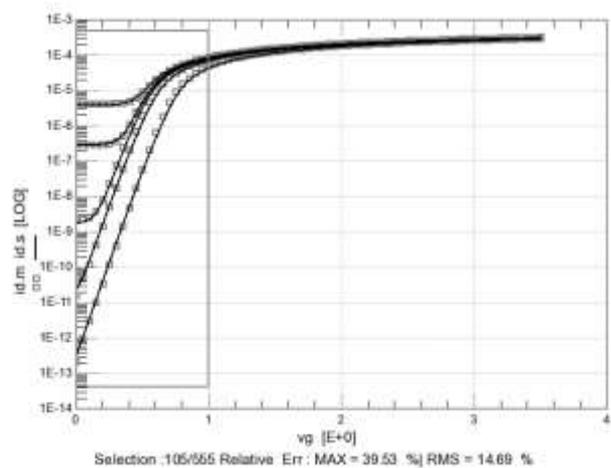


Рис. 2. Входная ВАХ КНИ n-МОПТ при различных значениях дозы ИИ. Vg=(0÷3.5)В, Vd=0.1В (полулогарифмический масштаб)

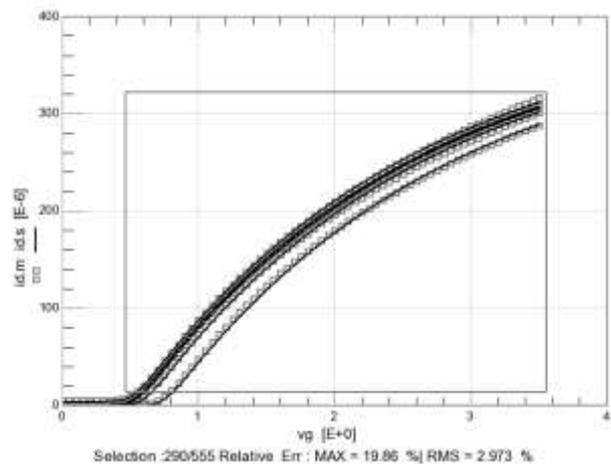


Рис. 3. Входная ВАХ КНИ n-МОПТ при различных значениях дозы ИИ. Vg=(0÷3.5)В, Vd=0.1В

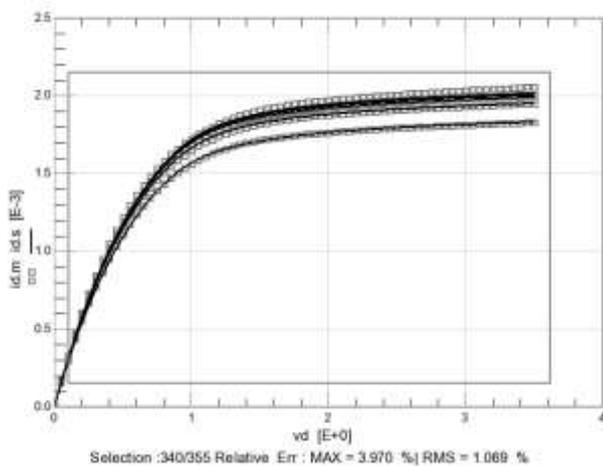


Рис. 4. Выходная ВАХ КНИ n-МОПТ при различных значениях дозы ИИ. $V_d=(0\div 3.5)V$, $V_g=3.5V$

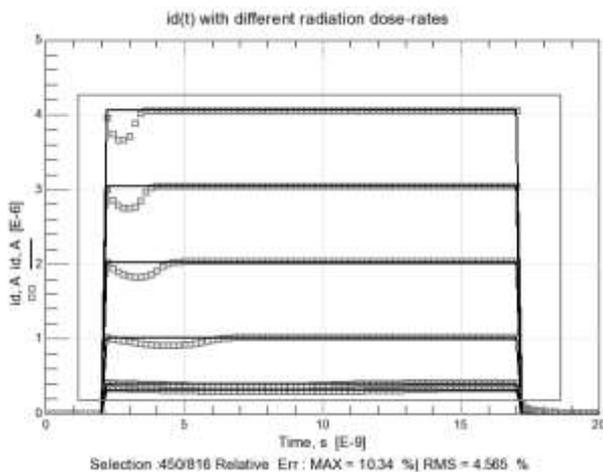


Рис. 5. Зависимость тока стока КНИ n-МОПТ от времени при различных значениях мощности дозы ИИ. $V_d=3.5V$, $V_g=0V$

IV. СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЦЕНОЧНОЙ СБИС

Средствами САПР Cadence проведено схемотехническое моделирование оценочной СБИС в условиях воздействия СФ с использованием модифицированных SPICE-моделей КНИ МОПТ. Оценочная СБИС представляет собой микросхему статического оперативного запоминающего устройства (СОЗУ), изготовленную по КМОП КНИ технологии с проектными нормами 0.35 мкм. В табл. 4 представлены экспериментальные и смоделированные значения динамического тока потребления СБИС (I_{CCO}) для соответствующих доз ИИ, а также требование технического задания на разработку (ТЗ).

Анализ результатов, приведенных в табл. 4, показал, что при дозах ИИ (D/D_{max}), превышающих 0.25-0.3, требование ТЗ по уровню тока потребления I_{CCO} не выполняется. Для обеспечения необходимого уровня стойкости СБИС к воздействию суммарной накопленной дозы ИИ разработчиками было применено техническое решение, обеспечивающее

низкий уровень радиационно-индуцированных токов утечки вдоль скрытого окисла КНИ структуры. Результаты испытаний СБИС СОЗУ на специфичность приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения динамического тока потребления СБИС СОЗУ (I_{CCO}) при различных дозах ИИ

D/D _{max}	Динамический ток потребления I_{CCO} , мА		
	Эксперимент	Моделирование	ТЗ
0	19.9	22.6	40
0.25	20.04	30.2	
0.5	20.13	72.7	
0.75	20.34	126.9	
1	21.62	1628.6	

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описаны способы и алгоритм модификации стандартной компактной SPICE-модели КНИ МОПТ BSIMSOI3.2 для учета стационарного и импульсного воздействия ИИ. Моделирование радиационно-индуцированных токов утечки осуществлено с помощью функциональной зависимости параметра модели *ISREC* от дозы ИИ. Отсутствие в макромодели дополнительных МОП-транзисторов (MOS3) сократило время моделирования в среднем на 15%, и этот параметр приблизился к значению для стандартной модели ($\Delta=3\%$).

Проведена экстракция радиационных параметров модифицированной SPICE-модели КНИ n-МОПТ. Относительная погрешность моделирования входных ВАХ составила 20% и 40% в надпороговой и подпороговой области, соответственно, выходных ВАХ – 4%. Погрешность моделирования всплеска тока стока при импульсном воздействии ИИ составила 11%.

Проведено моделирование электрической схемы КМОП КНИ СБИС СОЗУ с проектными нормами 0.35 мкм с использованием модифицированных SPICE-моделей КНИ МОПТ. Полученные результаты помогли оценить уровень стойкости СБИС к воздействию СФ и выявить слабые места в ее конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Петросянц К.О., Самбурский Л.М., Харитонов И.А., Ятманов А.П. Компактная макромодель КНИ/КНС МОП-транзистора, учитывающая радиационные эффекты // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА. 2011. № 1(87). С. 20-28.
- [2] Virtuoso Spectre Circuit Simulator Device Models and Circuit Components / Cadence Design Systems, Inc. - 555 River Oaks Parkway, San Jose, CA 95134, USA. 2004. 1274 p.
- [3] Денисенко В.В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и нанoeлектронике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 408 с.
- [4] Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП ИС. М.: Радио и связь, 1994. 164 с.