

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.382.32

Компактная макромоделль КНИ/КНС МОП-транзистора, учитывающая радиационные эффекты

К.О.Петросянц, Л.М.Самбурский, И.А.Харитонов

Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет)

А.П.Ятманов

НИИ измерительных систем (г. Нижний Новгород)

Разработана компактная макромоделль BSIMSOI-RAD для КНИ/КНС КМОП-транзисторов, учитывающая факторы радиационного воздействия. Описана автоматизированная процедура определения параметров макромоделли, показаны возможности ее использования для анализа радиационной стойкости схемных фрагментов КМОП БИС в зависимости от суммарной поглощенной дозы. Приведены оценки затрат времени на моделирование.

Ключевые слова: радиационное воздействие, радиационная стойкость, КНИ/КНС КМОП-технология, макромоделлирование, экстракция параметров.

КМОП-приборы со структурой кремний–на–изоляторе/сапфире (КНИ/КНС КМОП) являются перспективной элементной базой для создания радиационно стойких схем для аэрокосмических систем, электронных устройств атомной энергетики, военной техники и других специальных применений. Для сокращения сроков и затрат при проектировании таких схем в дополнение к экспериментальным методам широко применяются методы моделирования на разных уровнях проектирования аппаратуры: на уровне транзисторных структур используются системы приборно-технологического проектирования (TCAD); на уровне простейших схемных фрагментов – системы схемотехнического проектирования (SPICE); на уровне сложных фрагментов или БИС в целом используются системы схемотехнического (SPICE) или логического проектирования.

Схемотехнические модели являются принципиально важным элементом в процессе проектирования, связующим звеном между уровнем отдельных транзисторов и схемных фрагментов. Использование схемотехнических моделей дает возможность учесть влияние радиационных эффектов в транзисторах на функционирование всей схемы.

Схемы специального применения могут подвергаться воздействию различных факторов радиационного влияния: суммарной поглощенной дозы, импульсного радиационного воздействия и воздействия одиночных заряженных частиц. Известно, что с уменьшением проектных норм (в частности, толщины подзатворного диэлектрика) основным ограничивающим фактором стойкости к суммарной поглощенной дозе стано-

вятся радиационные утечки по границе раздела нижнего и бокового оксидов с рабочей областью n -канальных КНИ/КНС МОП-транзисторов [1].

Стандартные схемотехнические модели, включенные в SPICE-подобные программы анализа ИС и БИС, не учитывают радиационные эффекты. Для формирования компактных моделей, учитывающих факторы радиационного влияния, в промышленных схемотехнических САПР существует несколько путей.

Первый – создание набора программных функций на языке C, Verilog-AMS и др., описывающих радиационное воздействие, динамически или статически подключаемых к стандартным моделям [2, 3]. Статическое подключение модели подразумевает включение модели в официальную версию симулятора. Такой способ требует взаимодействия с фирмой-производителем САПР. Однако статически подключаемые функции выполняются существенно быстрее. Динамически (во время исполнения программы) подключенные функции выполняются медленнее, чем заданные стандартными схемными элементами [4], однако их включение может выполнить квалифицированный программист-пользователь программы. Модель, подключаемая статически, обычно создается в расчете на конкретную версию симулятора; при обновлении версии программы может потребоваться изменить и код модели. Модель, подключаемая динамически, обычно создается в виде, пригодном для подключения к любой версии симулятора и любой версии САПР, поддерживающей механизм динамического подключения.

Второй путь – формирование макро модели на основе какой-либо схемотехнической модели, уже включенной в библиотеку моделей данной САПР [4]. При таком подходе базовая модель дополняется стандартными схемотехническими элементами и достаточно простыми математическими выражениями, учитывающими особенности поведения моделируемой полупроводниковой структуры. В этом случае модель работает быстрее, чем при подключении достаточно сложных выражений, вычисляемых с помощью модулей C, Verilog-AMS и др., но от разработчика требуется хорошее знание схемотехники и особенностей конкретного симулятора. Не всегда оказывается возможным создать универсальную макро модель, пригодную для использования в любой версии симулятора, так как различные симуляторы часто имеют отличия в синтаксисе входного файла и в возможностях управления моделируемой схемой. Однако во многих практических случаях необходимые модификации может внести квалифицированный пользователь целевой САПР.

В работе выбран макро модельный подход на основе использования стандартных моделей, так как он позволяет работать с подавляющим большинством симуляторов и легко модифицировать макро модель при необходимости. Кроме того, учет радиационных эффектов с помощью макро модели имеет и дополнительные преимущества: простота учета любого необходимого набора эффектов при достаточном для практических применений уровне точности, понятность процедуры экстракции параметров моделей и возможность использования любой базовой модели МОП-транзистора в зависимости от проектных норм и режимов работы схемы.

Макро модель BSIMSOI-RAD разработана для описания субмикронных КНИ/КНС КМОП-транзисторов с учетом радиационных эффектов суммарной поглощенной дозы, импульсного облучения и одиночных ядерных частиц (ОЯЧ). Она предназначена для оценки эффективности предлагаемых конструктивно-технологических и схемотехнических решений, выявления «слабых» схемных узлов. Предшествующие варианты макро модели – SOI/SOS-MIEM на основе MOS3 и BSIM3 [5] в течение долгого времени были единственными SPICE-моделями КНИ/КНС КМОП-транзистора, учитывающими

эффекты радиационного воздействия и имеющими открытую структуру, уравнения и процедуру экстракции параметров.

Состав макромодели BSIMSOI-RAD. Эквивалентная электрическая схема макромодели приведена на рис.1. Ее основная часть – верхний МОП-транзистор $M_{\text{верх}}$ – описывается стандартной моделью BSIMSOI3 v3.2 с радиационно зависимыми параметрами. Модель BSIMSOI достаточно физична, универсальна, учитывает эффекты малых размеров и все режимы обеднения КНИ/КНС МОПТ (полное, неполное и частичное), поэтому наиболее широко используется для проектирования КНИ/КНС КМОП БИС. Для проектирования радиационно стойких схем модель BSIMSOI дополняется элементами, учитывающими возникающие токи утечки при различных видах радиационного воздействия.

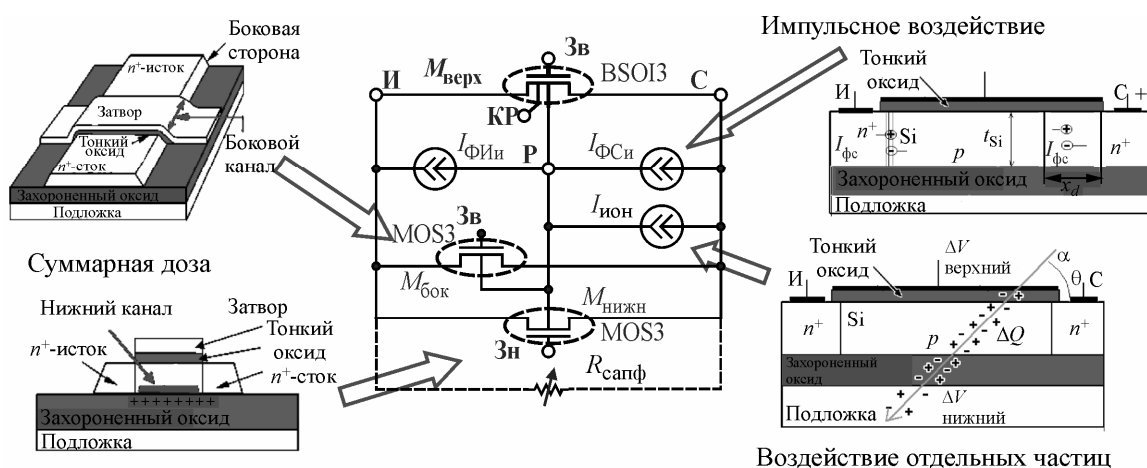


Рис.1. Эквивалентная схема макромодели BSIMSOI-RAD

Эффекты полной поглощенной дозы. Для основного (верхнего) транзистора радиационно зависимыми являются параметры V_{TH0} и др. – для порогового напряжения, $U0$, UA и др. – для подвижности, CIT , $VOFF$ и др. – для предпорогового наклона ВАХ $I_C = f(V_{зи})$. Их значения зависят от суммарной полученной дозы и определяются выражениями, основанными на классических зависимостях и учитывающими накопление с дозой дырочного заряда в подзатворном окисле и увеличение плотности поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO₂.

Для параметров модели V_{TH0} , $VOFF$ используются выражения, описывающие абсолютные сдвиги от полученной дозы D :

$$V(D) - V(0) = a_1 + a_2 \cdot \exp(-a_3 D). \quad (1)$$

Для параметров модели, имеющих смысл подвижности $U0$, ее коэффициентов UA , UB и коэффициента, учитывающего наклон предпороговой ВАХ CIT , используются выражения, описывающие относительные изменения от полученной дозы D :

$$U(D) / U(0) = a_1 + a_2 \cdot \exp(-a_3 D). \quad (2)$$

Здесь a_1 , a_2 , a_3 – подгоночные коэффициенты, зависящие от дозы и электрического режима работы транзистора во время облучения.

Возникающие в n -канальных КНИ/КНС МОП-транзисторах токи утечки по нижней и боковым граням кремниевого островка, вклад которых в радиационную деградацию КНИ/КНС МОПТ возрастает с уменьшением проектных норм [6], учитываются включением дополнительных МОП-транзисторов $M_{\text{бок}}$ (боковая утечка) и $M_{\text{нижн}}$ (утечка по

нижней грани) (см. рис.1). Так как для описания токов утечки можно использовать более простые выражения, чем для основного транзистора, то эти токи описываются более простой моделью MOS3 (что ускоряет расчет) с зависимыми от дозы параметрами: V_{TO} – для порогового напряжения, UO – для подвижности; NFS – для предпорогового наклона ВАХ $I_C = f(V_{зи})$. Для них используются выражения, аналогичные (1) и (2).

Эффекты импульсного воздействия. Первичные фототоки в стоковом и истоковом $p-n$ -переходах, возникающие при импульсном облучении, описываются генераторами тока $I_{фи}(t)$, $I_{фс}(t)$.

Первичные фототоки в КНИ/КНС-структурах в основном определяются «мгновенными составляющими» от обедненной области переходов сток–рабочая область и исток–рабочая область, «задержанные» составляющие фототока в КНИ/КНС МОП-структурах практически отсутствуют вследствие малого объема собирания носителей. Поэтому фототок для каждого генератора тока учитывает только мгновенную составляющую и рассчитывается с помощью выражения:

$$i_{\text{мгнов}}(t) = g\gamma X_d S k_V k_W,$$

где $g = qK$ – константа генерации, Кл·см⁻³·рад⁻¹; q – заряд электрона; K – степень генерации ($4 \cdot 10^{13}$ см⁻³·рад⁻¹); $\gamma(t)$ – мощность дозы, рад/с; S – площадь $p-n$ -перехода, м²; k_V – коэффициент, учитывающий смещение на $p-n$ -переходе; k_W – коэффициент, учитывающий ширину канала транзистора.

Паразитная проводимость сапфира (для МОП-транзистора, изготовленного по технологии кремний–на–сапфире) при воздействии импульсного излучения описывается сопротивлением $R_{\text{сапф}}(t)$, зависящим от мощности дозы $\gamma(t)$:

$$R_{\text{сапф}}(t) = \frac{R_{\text{Al}_2\text{O}_3} L}{W d \gamma(t)}, \quad (3)$$

где $K_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 6,8 \cdot 10^{-14}$, Ом·см·рад/с; L – длина; W – ширина канала транзистора; d – эффективная толщина проводящего участка сапфира.

Эффекты воздействия ОЯЧ. Диффузионная и дрейфовая составляющие тока, возникающего при собирании заряда из трека частицы электрическим полем $p-n$ -перехода стока, описываются генератором тока $I_{\text{ион}}(t)$. Макромодель автоматически учитывает усиление первичного тока паразитным биполярным транзистором, имеющимся в модели BSIMSOI базового КНИ/КНС МОПТ (в случае плавающей рабочей области).

Величина источника тока $I_{\text{ион}}(t)$ аппроксимируется классическим выражением с помощью двух экспонент:

$$i_{\text{ф}}(t) = \frac{Q_{\text{тр}}}{\tau_n - \tau_p} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) \right] \cdot k_V,$$

где τ_n и τ_p – постоянные времени процессов накопления и рассасывания заряда; $Q_{\text{тр}}$ – полный сгенерированный в треке заряд, рассчитываемый:

$$Q_{\text{тр}} = \frac{q\rho L_{\text{тр}} \theta \cdot LET}{E_{eh}},$$

где q – заряд электрона; ρ – плотность вещества рабочей области (2,33 г/см³ для Si); $L_{\text{тр}} = t_{\text{Si}}/\cos\theta$ – длина трека частицы в слое кремния; θ – угол падения частицы; LET – потери энергии частицы на торможение, МэВ·см²/мг; E_{eh} – энергия образования элек-

тронно-дырочной пары (3,6 эВ для Si); k_V – коэффициент, учитывающий смещение на p - n -переходе с учетом встроенного потенциала p - n -перехода $k_V = V_{pn} + \phi^*$.

Макромодельный подход позволяет достаточно просто модифицировать модель за счет учета дополнительных эффектов, например электрического смещения [7–9] и температуры [10] при дозовом облучении, растяжение радиационно-индуцированных импульсов в цифровых схемах [11] и др.

Экстракция параметров модели. Вопросы автоматизации экстракции параметров КНИ/КНС МОПТ в условиях внешних воздействий в литературе рассмотрены не достаточно полно. В настоящей работе подробно описана пошаговая полуавтоматизированная процедура экстракции радиационно зависимых параметров макромодели BSIMSOI-RAD для случая суммарной поглощенной дозы с использованием автоматизированного комплекса IC-CAP [12], позволяющего экстрагировать параметры макромоделей.

Описанная ниже методика проиллюстрирована с использованием экспериментальных характеристик облученных КНИ МОПТ с размерами $L/W = 0,25/8$ мкм [6].

Процедура экстракции параметров для суммарной поглощенной дозы. Определение набора параметров макромодели проводится с помощью стандартного пакета экстракции SPICE-моделей и макромоделей IC-CAP с модулем AdMOS с использованием модифицированной процедуры экстракции [13–14]. Исходными данными являются наборы ВАХ и ВФХ стандартных КНИ/КНС МОП-структур при разных полученных дозах облучения, передаваемые в IC-CAP с помощью собственного программного интерфейса. Процедура экстракции, позволяющая учесть эффекты суммарной дозы, содержит следующие шаги.

Шаг 1. Определение набора параметров модели BSIMSOI основного (верхнего на рис. 1) транзистора для случая необлученного МОПТ (используется стандартная процедура экстракции параметров данной модели и стандартный набор измеренных характеристик необлученного транзистора [12]).

Шаг 2. Разделение радиационно-индуцированных токов утечки, возникающих по нижней и боковой границе активной области кремния, с использованием специальных тестовых транзисторов:

- кольцевой транзистор (R - или O -типа) или транзистор H -типа (в которых практически отсутствует боковая утечка) осуществляет выделение ВАХ и определение параметров верхнего МОП-транзистора для разных полученных доз облучения (рис.2,а) при напряжении на нижнем затворе $V_{3n} < 0$ (что исключает влияние $M_{\text{нижн}}$);

- прибор того же типа осуществляет выделение ВАХ и определение параметров нижнего паразитного МОП-транзистора для ряда полученных доз облучения (рис.2,б) при напряжении на верхнем затворе $V_{3в} < 0$ (что исключает влияние $M_{\text{верхн}}$);

- линейный транзистор (F - или I -типа) или транзистор A -типа (для которых имеют место как донные, так и боковые утечки) осуществляет выделение ВАХ и определение параметров бокового паразитного МОП-транзистора для ряда полученных доз облучения (рис.2,в) при известных ВАХ верхнего МОПТ и при напряжении на нижнем затворе $V_{3н} < 0$ (что исключает влияние $M_{\text{нижн}}$).

Шаг 3. Определение коэффициентов аппроксимирующих зависимостей вида (1) и (2) радиационно зависимых параметров моделей BSIMSOI (верхнего) и MOS3 (паразитных МОПТ) от полученной дозы путем подгонки смоделированных и экспериментальных характеристик МОПТ.

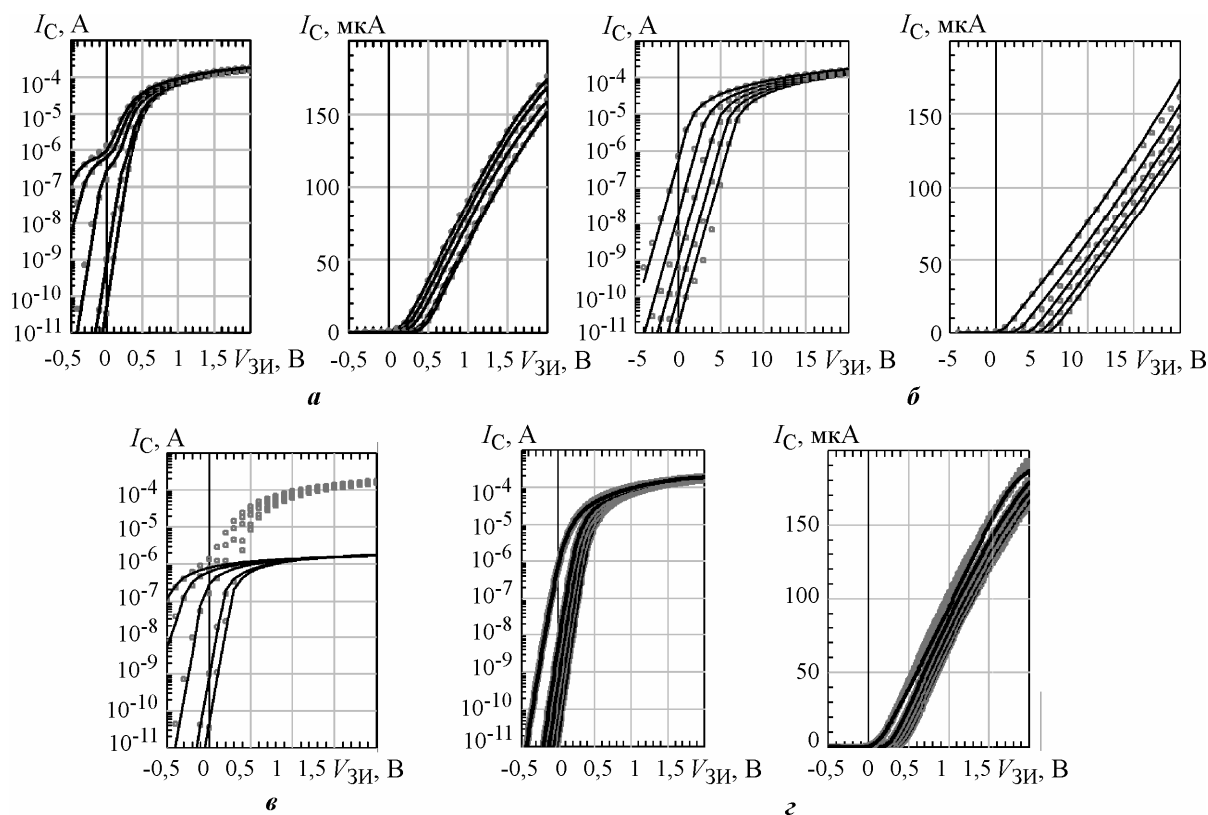


Рис.2. Сравнение экспериментальных [6] (значки) и смоделированных (линии) с помощью BSIMSOI-RAD сток-затворных характеристик КНИ МОПТ с размерами $L/W = 0,25/8$ мкм: а – всей макромодели; б – паразитного нижнего транзистора $M_{нижн}$; в – паразитного бокового транзистора $M_{бок}$; г – базового верхнего транзистора $M_{верх}$

Значения подгоночных коэффициентов для параметров макромодели КНИ МОПТ с $L/W = 0,25/8$ мкм, имеющего ВАХ, показанную на рис.2,г, приведены в табл.1. Соответствующие графики показаны на рис.3.

Таблица 1

Значения радиационных коэффициентов макромодели BSIMSOI-RAD, полученные с использованием экспериментальных данных [6]

| Коэффициент | $M_{верх}$ | | | | | |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| | $VTH0$ | $U0$ | CIT | $VOFF$ | UA | UB |
| a_1 | -0,5 | 0,7 | $1 \cdot 10^{-3}$ | -0,1 | 1,8 | 7 |
| a_2 | 0,5 | 0,3 | $-1 \cdot 10^{-3}$ | 0,1 | -0,8 | -6 |
| a_3 | $1,1 \cdot 10^{-6}$ | $1,2 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $1 \cdot 10^{-6}$ |
| Коэффициент | $M_{нижн}$ | | | $M_{бок}$ | | |
| | VTO | UO | NFS | VTO | UO | NFS |
| a_1 | -10 | 0,75 | 1,6 | -30 | 0,5 | 1 |
| a_2 | 10 | 0,25 | -0,6 | 30 | 0,5 | 0 |
| a_3 | $3 \cdot 10^{-6}$ | $2,5 \cdot 10^{-6}$ | $1,4 \cdot 10^{-6}$ | $50 \cdot 10^{-9}$ | $1 \cdot 10^{-6}$ | $1,4 \cdot 10^{-6}$ |

При схемотехническом моделировании в программах Eldo, Spectre, UltraSim и др. величина полной дозы D и параметры радиационного импульса задаются для всей схемы в целом, параметры генератора тока $I_{ион}$ на рис.1 задаются для конкретного МОПТ, на который воздействует ОЯЧ.

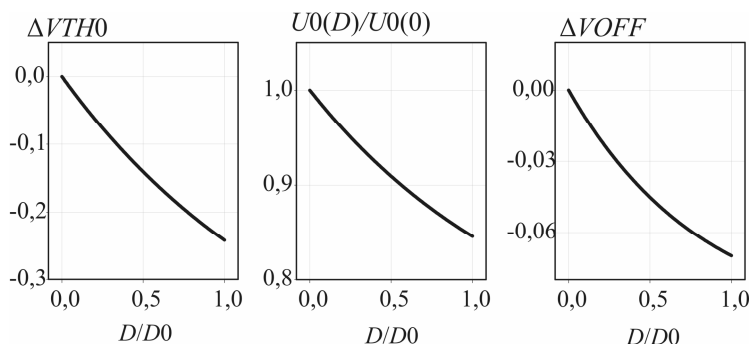


Рис.3. Графики зависимости от полной поглощенной дозы параметров V_{TH0} , U_0 , $VOFF$ модели BSIMSOI базового транзистора макромодели BSIMSOI-RAD для данных [6]

Сравнение затрат времени на моделирование с использованием макромодели BSIMSOI-RAD и стандартной модели BSIMSOI. Сравнение приведено для трех тестовых элементов:

- 1) сток-затворной ВАХ (3300 точек) КНИ n -МОПТ ($L/W=0,35/1,1$ мкм);
- 2) передаточной характеристики инвертора ($L/W = 0,35/1,1$ мкм для n -МОПТ и $L/W = 0,35/3,1$ мкм для p -МОПТ) (3300 точек) с напряжением питания $V_{dd} = 3,3$ В;
- 3) переходной характеристики того же инвертора (25 периодов при частоте трапецидального импульса 1,2 ГГц), входная и нагрузочная схема – идентичные инверторы.

Использованы три варианта модели КНИ МОПТ с контактом к рабочей области: BSIMSOI; BSIMSOI с радиационно зависимыми параметрами; макромодель BSIMSOI-RAD с дополнительными транзисторами и радиационно зависимыми параметрами. Моделирование проводилось с использованием ЭВМ на основе процессора Intel Core2 2 ГГц и 1 Гб ОЗУ с помощью пакета Cadence Spectre 5.1. В табл.2 приведены усредненные затраты времени счета для каждого теста.

Таблица 2

Сравнительные оценки времени счета (в мс) макромодели BSIMSOI-RAD и стандартной модели BSIMSOI

| Параметр | Вариант модели | | | | |
|---------------------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|--|----------------|
| | BSIMSOI | BSIMSOI + радиационные коэффициенты | | BSIMSOI + радиационные коэффициенты + дополнительные транзисторы | |
| Доза, рад | Не учитывается | 0 | $1 \cdot 10^6$ | 0 | $1 \cdot 10^6$ |
| ВАХ КНИ МОПТ | 183,429 | 183,714 | 185,429 | 203,714 | 203,714 |
| Передаточная характеристика инвертора | 249,714 | 250,571 | 251,429 | 275,429 | 277,714 |
| Переходная характеристика инвертора | 256,857 | 256,571 | 263,714 | 278,857 | 279,429 |

Как видно из таблицы, использование полного варианта макромодели увеличивает время моделирования на ~10% по сравнению со стандартной моделью BSIMSOI.

Разработанная макромодель BSIMSOI-RAD успешно использовалась для анализа характеристик цифровых и аналоговых фрагментов КНИ КМОП БИС с учетом суммарной поглощенной дозы и одиночных ядерных частиц [13–16]. Опыт использования

макромодели показывает, что погрешность описания статических ВАХ КНИ/КНС МОПТ не превышает 10–15% в диапазоне доз до $1,5 \cdot 10^6$ ед., динамических характеристик фрагментов – 20–25% в том же диапазоне доз. Увеличение времени моделирования с использованием макромодели по сравнению со стандартной моделью BSIMSOI составляет не более 10%, что практически не вносит дополнительных ограничений на выполнение схемотехнических расчетов.

Литература

1. **Tavernier C., Belhaddad K., Penzin O.** Impact of technology scaling in SOI back-channel total dose tolerance. A 2-D numerical study using self-consistent oxide code // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2000. – Т. 47. – № 3. – С. 620–627.
2. **Mavis D.G., Eaton P.H.** SEU and SET modeling and mitigation in deep submicron technologies // Proc. 45-th IEEE International Reliability Physics Symposium. – 2007. – P. 293–305.
3. A bias-dependent single-event compact model implemented into BSIM4 and a 90 nm CMOS process design kit / **J.S.Kaluppa, A.L.Sternberg, M.L.Alles et al.** // IEEE Trans. on Nuclear Science. – 2009. – Т. 56. – № 6. – С. 3152–3157.
4. **Francis A.M., Turowski M., Holmes J.A., Mantooth H.A.** Efficient modeling of single event transients directly in compact device models // Proc. IEEE International Behavioral Modeling and Simulation Conf. – 2007. – Sep. 2007. – P. 73–77.
5. **Petrosjanc K.O., Adonin A.S., Kharitonov I.A., Sicheva M.V.** SOI device parameter investigation and extraction for VLSI radiation hardness modeling with SPICE // Proc. Intl. Conf. on Microelectronic Test Structures. – 1994. – P. 126–129.
6. New Insights into Fully-Depleted SOI Transistor Response after Total-Dose Irradiation / **J.R.Schwank, M.R.Shaneyfelt, P.E.Dodd et al.** // IEEE Trans. on Nuclear Science. – 2000. – Т. 47. – № 7. – С. 604–612.
7. **Barnaby H.J.** Total ionizing doze effects in modern CMOS technologies // IEEE Trans. on Nuclear Science. – 2006. – Т. 53. – № 6. – С. 3103–3121.
8. Radiation effects in MOS oxides technologies / **J.R. Schwank, M.R. Shaneyfelt, D.M. Fleetwood et al.** // IEEE Trans. on Nuclear Science. – 2008. – Т. 55. – № 4. – С. 1833–1853.
9. Worst-case bias during total dose irradiation of SOI transistors code / **V.Ferlet-Cavrois, T.Colladant, P.Paillet, et al.** // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2000. – Т. 47. – № 6. – С. 2183–2188.
10. **Alvarado J., Boufouss E., Kilchytska V., Flandre D.** Compact model for single event transients and total dose effects at high temperatures for partially depleted SOI MOSFETs // Microelectronics Reliability. – 2010. – Т. 50. – № 9–11. – С. 1852–1856.
11. **Tuinenga P.W., Massengill L.W.** Circuit modeling of single-event transient pulse stretching in digital CMOS // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2009. – Т. 56. – № 6. – С. 3165–3171.
12. Agilent 85190A, IC-CAP 2006 User's Guide.
13. Simulation of Radiation Effects in SOI CMOS Circuits with BSIMSOI-RAD macromodel / **K.O.Petrosjanc, I.A.Kharitonov, E.V.Orekhov et al.** // Proc. of 7-th IEEE East-West Design & Test Intl. Symposium (EWDTS'09) (Moscow, Russia, 18–21 Sept. 2009). – 2009. – P. 243–246.
14. **Kharitonov I. A.** Multi-level methodology for CMOS SOI/SOS MOSFET parametrization for IC radiation hardness simulation with SPICE // Proc. of 8th IEEE EWDTS Symposium. – 2010. – P. 358–361.
15. **К.О.Петросяни, И.А.Харитонов, Л.М. Самбурский и др.** Исследование характеристик элементной базы аналоговых КНИ КМОП схем, изготовленных по технологии XFAV, с учетом суммарной поглощенной дозы // Электроника, микро- и наноэлектроника: сб. науч. тр. – М.: МИФИ, 2009. – С. 57–66.
16. Анализ влияния суммарной поглощенной дозы на характеристики элементной базы КНИ КМОП БИС ОЗУ / **К.О.Петросяни, И.А.Харитонов, Л.М.Самбурский и др.** // Электроника, микро- и наноэлектроника: сб. науч. тр. – М.: МИФИ, 2010. – С. 90–95.

Статья поступила
14 сентября 2010 г.

Петросянц Константин Орестович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и электротехники, декан факультета автоматизации и вычислительной техники МИЭМ. *Область научных интересов:* моделирование полупроводниковых приборов и элементов БИС, САПР элементной базы ЭВА и РЭА.

Самбурский Лев Михайлович – старший преподаватель кафедры электроники и электротехники МИЭМ. *Область научных интересов:* моделирование элементной базы радиационно стойких БИС. **E-mail: eande@miem.edu.ru**

Харитонов Игорь Анатольевич – кандидат технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой электроники и электротехники МИЭМ. *Область научных интересов:* моделирование и проектирование элементной базы электроники специального назначения, ПЛМ, системы–на–кристалле.

Ятманов Александр Павлович – начальник отдела НИИ измерительных систем (г. Нижний Новгород). *Область научных интересов:* разработка и моделирование технологических процессов и интегральных приборов, моделирование элементной базы радиационно стойких БИС.