

УДК 621.382

Экстракция параметров компактных моделей элементной базы интегральных микросхем специального назначения

Ловшенко И. Ю., Стемпицкий В. Р., Шандарович В. Т.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Республика Беларусь
lovshenko@bsuir.by*

Получено: 11 ноября 2019 г.

Отрецензировано: 13 декабря 2019 г.

Принято к публикации: 16 декабря 2019 г.

Аннотация: *Представлены результаты применения процедуры экстракции параметров моделей МОП-транзистора и полевого транзистора с управляющим р–п-переходом, учитывающих воздействие радиационного излучения. Показано, что учет только части параметров, обладающих наибольшей чувствительностью к воздействию радиации, позволил сократить время проведения экстракции и упростить математические выражения, применяемые для расчета параметров.*

Ключевые слова: *радиационная стойкость, ионизирующее излучение, приборно-техническое моделирование, САПР, SPICE, модель, экстракция.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Ловшенко И. Ю., Стемпицкий В. Р., Шандарович В. Т. Экстракция параметров компактных моделей элементной базы интегральных микросхем специального назначения // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 4. С. 456—465.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Ловшенко, И. Ю. Экстракция параметров компактных моделей элементной базы интегральных микросхем специального назначения / И. Ю. Ловшенко, В. Р. Стемпицкий, В. Т. Шандарович // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2019. — Т. 2, № 4. — С. 456—465.

Extraction parameters of the compact model of hardware components IC chip special purpose

I. Yu. Lovshenko, V. R. Stempitsky, and V. T. Shandarovich
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
6, P. Brovki Str., Minsk, 220013, Belarus
lovshenko@bsuir.by

Received: November 11, 2019

Peer-reviewed: December 13, 2019

Accepted: December 16, 2019

Abstract: *The results of applying the procedure for extracting parameters models of MOS transistor and a field effect transistor with a p-n-junction, taking into account the effect of radiation, are presented. It is shown that taking into account only a part of the parameters with the highest sensitivity to radiation, allowed to reducing the time of extraction and simplify the mathematical expressions used to calculate the parameters.*

Keywords: *hardness, ionizing radiation, instrumentation modeling, CAD, SPICE, model, extraction.*

For citation (IEEE): I. Yu. Lovshenko et al. "Extraction parameters of the compact model of hardware components IC chip special purpose," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 4, pp. 456–465, 2019. (In Russ.).

1. Введение

Применение компьютерного моделирования позволяет сократить сроки разработки и повысить эксплуатационные характеристики стойких к специальным воздействующим факторам интегральных микросхем (ИМС). Одной из важнейших задач при использовании компьютерного моделирования эксплуатационных характеристик электронной компонентной базы (ЭКБ) специального назначения является создание математических моделей, учитывающих влияние стационарных видов и импульсных излучений, в том числе и тяжелых заряженных частиц. Основные требования, предъявляемые к этим моделям, является адекватность их физического описания и достаточная точность, так как от этого зависит достоверность приборно-технологического и схмотехнического проектирования. В применяемых в промышленности системах приборно-технологического моделирования используются встроенные модели учета радиационных эффектов с рядом существенных ограничений, либо учитывается влияние только одного стационарного вида радиации, либо используются обобщенные модели иони-

зационных и структурных эффектов, но не учитывающие специфики структур современных полупроводниковых приборов (ПП) и ИМС. Таким образом, задача разработки моделей полупроводниковых приборов и элементов ИМС, учитывающих влияние специальных воздействующих факторов, и методики экстракции их параметров продолжает оставаться актуальной.

2. Анализ компактных моделей и методик экстракции их параметров

Компактные модели, или модели в виде эквивалентных схем (ЭС), на сегодняшний момент составляют большую часть из моделей, представленных в САПР [1]. При разработке компактной модели приходится преодолевать противоречие между ее точностью и быстродействием. Компактные модели делятся на физические и формальные; некоторые исследователи выделяют в отдельный класс табличные модели.

Традиционно учет радиационных эффектов осуществляется с использованием двух подходов: введение зависимостей параметров SPICE-модели транзистора от различных видов доз; а также создание электрических (компактных) моделей полупроводниковых приборов, в эквивалентные схемы которых вводятся дополнительные элементы, зависящие от поглощенной дозы или интегрального потока [2].

Общая процедура экстракции параметров SPICE-моделей МОП-транзисторов с учетом воздействия стационарного радиационного излучения заключается в выполнении следующих этапов: определение параметров модели в нормальных условиях; определение наиболее радиационно-зависимых параметров модели; определение только выбранных параметров для каждой полученной дозы с последующей аппроксимацией гладкими функциями их зависимостей; введение полученных функций в SPICE-модель [3]. В [4] представлена процедура экстракции параметров модели BSIMSOI-RAD для КНИ/КНС МОП, которая в полной мере соответствует общей методике, описанной выше. Для устройств, изготовленных по КМОП-технологии, характерен большой набор геометрических размеров затвора, которые могут быть использованы проектировщиком. Поскольку геометрия устройств оказывает значительное влияние на чувствительность к излучению, параметры транзистора в моделях экспериментально идентифицируются для разных доз и геометрических размеров. Основной проблемой в этом методе является правильное извлечение параметров модели устройств, которые были измерены в эксперименте. Перед воздействием излучения параметры модели известны для различных вариаций техпроцесса. Отклонение электрических характеристик или па-

раметров модели для партии образцов, облученных и измеренных в дискретных дозах, можно интерполировать для разных доз и экстраполировать на разные варианты технологии, если время и бюджет не позволяют проводить компании дополнительные эксперименты [5].

Таким образом, можно сделать вывод, что получение адекватных результатов при построении моделей полупроводниковых приборов требует большого набора натуральных экспериментов, что непосредственно сказывается на стоимости и длительности разработки новых изделий микроэлектроники.

3. Результаты

Разработанные модели полупроводниковых приборов и ИМС специального назначения основаны на стандартных моделях [6, 7] и включают блоки, которые позволяют определить поправочные коэффициенты для наиболее подверженных изменениям при воздействии радиационного излучения параметров. В качестве примера рассмотрим стратегию экстракции для модели МОП-транзистора (базовая модель — BSIM4).

Для учета влияния воздействия ионизирующего излучения на электрические характеристики транзистора в модель введены дополнительные группы параметров с соответствующими коэффициентами, которые рассчитываются по аппроксимационным зависимостям, получаемым при анализе результатов экстракции параметров модели для приборных структур, подверженных влиянию ионизирующего излучения (в результате натурального или компьютерного эксперимента).

Блок-схема получения аппроксимационных зависимостей и значений параметров модели МОП-транзистора в укрупненном виде показана на рис. 2.

Для получения значений параметров модели BSIM4 проведена процедура экстракции SPICE-параметров с применением локальной оптимизации, основанная на физическом понимании модели. Некоторые этапы процедуры экстракции, выделенные разработчиками модели BSIM4 и характеризующиеся одинаковыми условиями проведения, были объединены для достижения лучших результатов оптимизации параметров модели. Некоторые из параметров модели BSIM4 определяются на этапе проектирования технологического процесса изготовления: толщина подзатворного диэлектрика и его диэлектрическая проницаемость ($TOXE$, $TOXP$, $DTOX$ или $EPSROX$); концентрация легирующей примеси в канале ($NDEP$); температура ($TNOM$); длина и ширина канала по фотошаблону (L , W); глубина залегания p - n -переходов (XJ). Экстракция параметров модели BSIM4 для

МОП-транзистора в нормальных условиях проведена посредством использования модуля Utmost IV программного комплекса Silvaco [8].

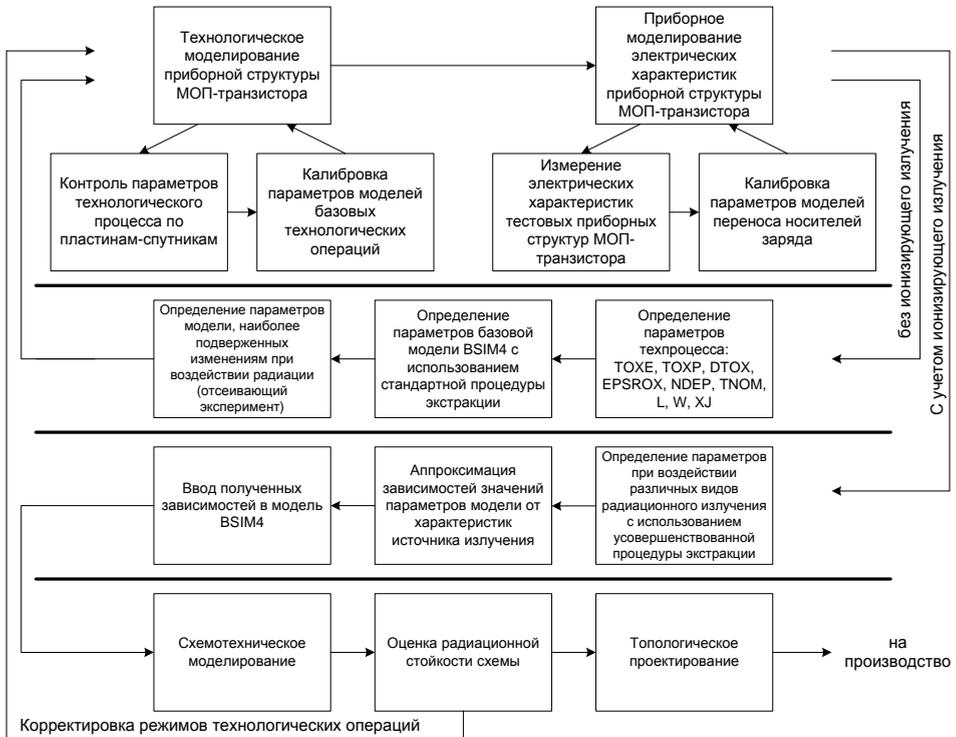


Рис. 1. Укрупненная блок-схема определения параметров модели МОП-транзистора, учитывающей воздействие ионизирующего излучения.

Fig. 1. An enlarged block diagram for determining the parameters of MOS transistor model that takes into account the effect of ionizing radiation

Измерение и моделирование зависимостей $I_C(V_{зи})$ проводилось как в линейном режиме ($V_{си} = 0,1 \text{ В}$), так и в режиме насыщения ($V_{си} = 5 \text{ В}$) при различных обратных смещениях на подложке ($V_{пи} = 0; -1; -2; -3 \text{ В}$). Измерение и моделирование зависимостей $I_C(V_{си})$ проводилось для различных напряжений на затворе ($V_{зи} = 2; 3; 4; 5 \text{ В}$) при отсутствии смещения на подложке ($V_{пи} = 0 \text{ В}$) и при обратном смещении ($V_{пи} = -3 \text{ В}$). На рис. 3 и 4 представлены ВАХ МОП-транзистора, рассчитанные с использованием экстрагированных параметров модели BSIM4 после повторного однократного осуществления всех этапов экстракции и соответствующие экспериментальные данные.

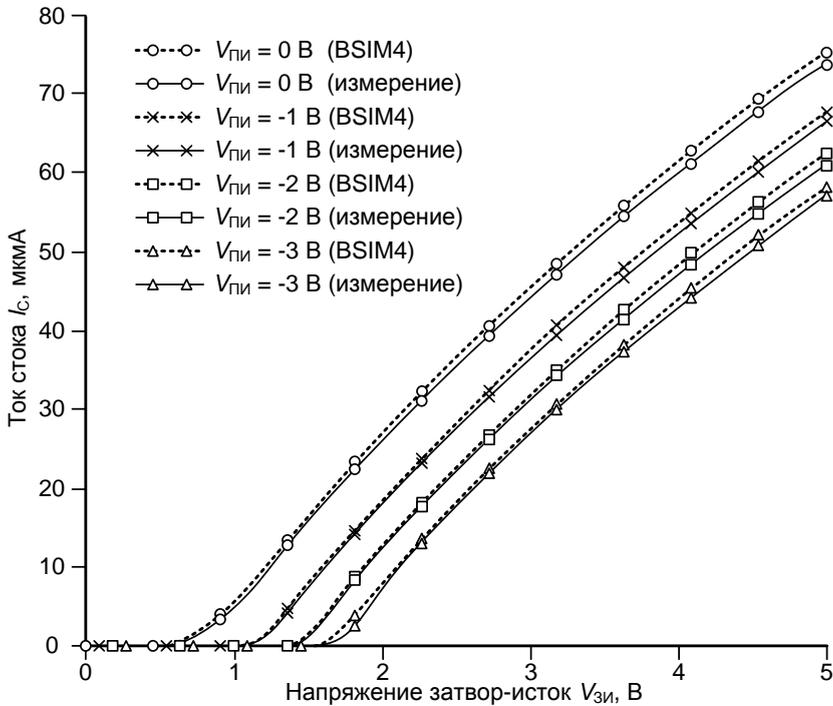


Рис. 2. Сравнение результатов моделирования характеристик МОП-транзисторов, рассчитанных на основе экстрагированного набора параметров модели BSIM4, с данными экспериментальных измерений (без учета специальных воздействующих факторов, $V_{ds} = 0,1$ В).

Fig. 2. Comparison results of modeling the characteristics of MOS transistors calculated on the basis of the extracted set of parameters BSIM4 model with experimental measurement data (excluding special influencing factors, $V_{ds} = 0,1$ V)

ВАХ, полученные с использованием экстрагированных значений параметров модели BSIM4, соответствуют результатам приборно-технологического моделирования. Относительная погрешность схемотехнического моделирования с использованием экстрагированного набора параметров в сравнении с экспериментальными данными составила не более 6,05 %.

В связи с тем, что при экстракции параметров модели BSIM4 приборной структуры МОП-транзистора, подверженного воздействию ионизирующего излучения, изменению подвергались только некоторые из них, то предложено упрощение процедуры экстракции (табл. 1). Определены параметры модели с учетом принятого упрощения для рентгеновского и нуклидного ^{60}Co источников при вариации значений полной поглощенной

дозы и мощности ионизирующего излучения, длины и ширины канала МОП-транзистора. Во всех случаях ВАХ, полученные с использованием экстрагированных значений параметров модели BSIM4, соответствуют результатам приборно-технологического моделирования (максимальная ошибка составляет 33 % для длины канала 2 мкм, средняя ошибка не превышает значения 10 %), что свидетельствует об эффективности исследуемой методики экстракции и внесенных усовершенствований.

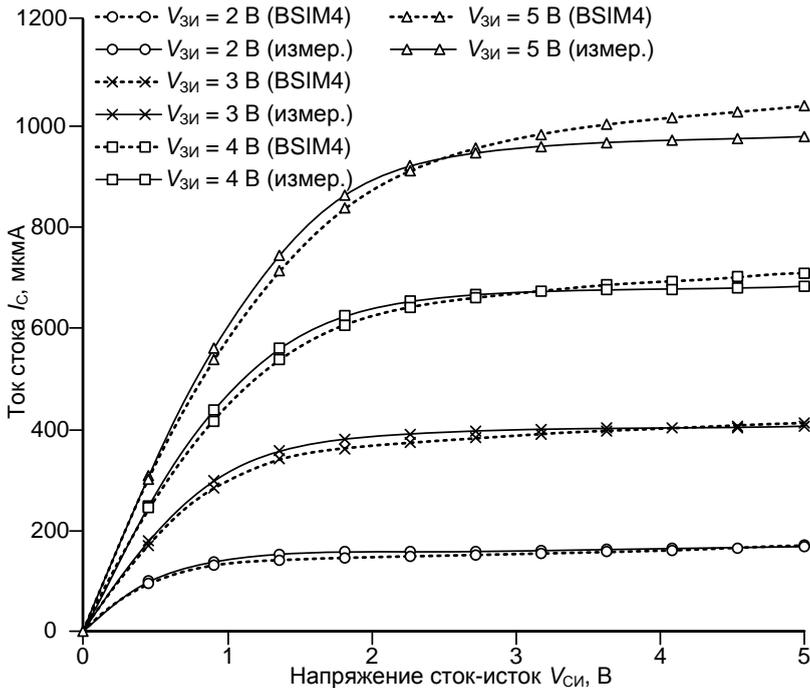


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования характеристик МОП-транзисторов, рассчитанных на основе экстрагированного набора параметров модели BSIM4, с данными экспериментальных измерений (без учета специальных воздействующих факторов, $V_{\text{ПИ}} = 0 \text{ В}$)

Fig. 3. Comparison results of modeling the characteristics of MOS transistors calculated on the basis of the extracted set of parameters BSIM4 model with experimental measurement data (excluding special influencing factors, $V_{\text{ss}} = 0 \text{ V}$)

С применением описанной выше методики также определены аппроксимационные зависимости параметров модели полевого транзистора с управляющим p-n-переходом (ПТУП) (базовая модель Шихмана — Ходжеса) (V_{T0} , L_{DEL} , W_{DEL} , R_{D} , $BETA$, $LAMBDA$) от величины флюенса и энергии электронов, протонов и нейтронов. Результаты моделирования в

программном комплексе компании Cadence [9] электрических характеристик ПТУП, с использованием экстрагированного набора параметров, в статическом режиме имеют ошибку не более 5 % от данных полученных в результате натурального и компьютерного эксперимента. Такая ошибка объясняется некоторыми допущениями и округлениями при построении аппроксимационных выражений зависимостей параметров модели от флюенса и энергии частиц проникающего излучения.

Табл. 1. Этапы упрощенной процедуры экстракции параметров модели BSIM4

Table 1. Stages of a simplified procedure for extracting BSIM4 model parameters

Номер этапа	Экстрагируемые параметры
1	UA, UB, VTH0, K1
2	VTH0, K1
3	UA, UB
4	LINT
5	K1

4. Заключение

Для моделей МОП-транзистора и ПТУП разработана методика экстракции параметров на основе натуральных измерений полупроводникового прибора или серии компьютерных экспериментов, выполненных с использованием программного комплекса компании Silvaco, с применением метода оптимизации Левенберга — Марквардта (стандартный нелинейный метод оптимизации). При апробации методики экстракции и калибровки параметров моделей установлено, что учет только части параметров, обладающих наибольшей чувствительностью к воздействию радиации, позволил сократить время проведения экстракции и упростить математические выражения, применяемые для расчета параметров (уменьшается время моделирования). Разработанная методика подготовительных расчетов и схемотехнического моделирования позволяет прогнозировать поведение полупроводниковых приборов и ИС специального назначения в условиях воздействия радиационного излучения, даже в случае отсутствия возможности проведения прямого физического эксперимента. Данная особенность приводит к существенному сокращению сроков разработки новых изделий микроэлектроники специального назначения и позволяет провести модернизацию (повысить эксплуатационные характеристики) уже существующих приборных и схемотехнических решений.

5. Благодарности

Исследования выполняются при финансовой поддержке и в рамках решения задач государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника» (задание 3.1.03).

Список литературы

1. Денисенко В. Моделирование МОП транзисторов. Методологический аспект // Компоненты и технологии. 2004. № 7. С. 26—29. № 8. С. 56—61. № 9. С. 32—39.
2. Chang-Liao K., Chang H. Extraction Method of Threshold Voltage and Transconductance to Assess Radiation Effects on MOS Circuits // Journal of Nuclear Science and Technology. 1999. 36:7. Pp. 630—632.
3. Исмаил-Заде М. Р., Самбурский Л. М. Программно-аппаратный комплекс для экстракции параметров SPICE-моделей МОП-транзисторов с учетом воздействия стационарного радиационного излучения. В кн. : Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ им. Е. В. Арменского : материалы конф. М. : МИЭМ НИУ ВШЭ, 2015. С. 262—263.
4. Петросянц К. О., Самбурский Л. М., Харитонов И. А., Ятманов А. П. Компактная макромодель КНИ/КНС МОП-транзистора, учитывающая радиационные эффекты // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2011. № 1 (87). С. 20—28.
5. Prinzie J., Steyaert M., Leroux P. Radiation Effects in CMOS Technology. In : Radiation Hardened CMOS Integrated Circuits for Time-Based Signal Processing. 2018. P. 1—20.
6. Chauhan Y. S., Niknejad Ali M., Hu C. BSIM4 4.8.1 MOSFET Model. Berkeley : University of California. 2017. 177 p.
7. Antognetti P. Semiconductor Device Modeling with SPICE. McGraw-Hill. 1988.
8. Сайт фирмы Silvaco [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.silvaco.com/>
9. Сайт фирмы Cadence [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.cadence.com/>

Информация об авторах

Ловшенко Иван Юрьевич, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4) научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г. Минск, Республика Беларусь.

Стемпницкий Виктор Романович, канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника научно-исследовательской части, научный руководитель научно-исследовательской лаборатории «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4) научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г. Минск, Республика Беларусь.

Шандарович Вероника Томашевна, аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники, мл. науч. сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4) научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г. Минск, Республика Беларусь.

Information about the authors

Ivan Yu. Lovshenko, Head of the Research Laboratory “Computer Projection of Micro- and Nanoelectronic Systems” (Research Laboratory 4.4) of the research department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR), Minsk, Republic of Belarus.

Victor R. Stempitsky, Ph.D., Associate Professor, Deputy Head of Research and Development Department Sc. Adviser of “CAD in Micro- and Nanoelectronics” (Research Laboratory 4.4) Laboratory Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR), Minsk, Republic of Belarus.

Veronika T. Shandarovich, postgraduate student of micro- and nanoelectronics department, researcher of Research Laboratory 4.4 R&D department of BSUIR, Minsk, Republic of Belarus.