

УДК 621.382

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ 90-НАНОМЕТРОВОГО МОП-ТРАНЗИСТОРА

А.М. БОРОВИК, В.Т. ХАНЬКО, В.Р. СТЕМПИЦКИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 31 марта 2017

Аннотация. Разработана методика экстракции и идентификации параметров электрических моделей наноразмерных полупроводниковых приборов, основанная на применении методов оптимизации. Эффективность предлагаемого подхода к идентификации, экстракции и оптимизации параметров электрических моделей полупроводниковых приборов продемонстрирована на примерах экстракции SPICE-параметров моделей BSIM4 и HiSIM2 для МОП-транзисторов стандартной конструкции, изготовленных по технологии, обеспечивающей минимальную длину канала 90 нм.

Ключевые слова: электрическая модель, экстракция параметров, оптимизация, наноразмерный МОП-транзистор.

Abstract. The technique of extraction and identification of electrical models parameters for nanoscale semiconductor devices based on optimization methods application is developed. The proposed approach efficiency to identification, extraction and optimization of parameters of semiconductor devices electrical models is demonstrated by examples of BSIM4 and HiSIM2 models SPICE parameters extraction for standard design MOS transistors manufactured using the technology providing minimum channel length of 90 nm.

Keywords: electrical model, parameters extraction, optimization, nanoscale MOSFET.

Doklady BGUIR. 2017, Vol. 105, No. 3, pp. 65–69

Electrical model of the 90 nm MOSFET

A.M. Borovik, V.T. Khanko, V.R. Stempitsky

Введение

Современные программные средства проектирования и моделирования в микроэлектронике основаны на использовании различных физико-математических моделей процессов, имеющих место в приборных структурах. Уравнения, а также параметры этих моделей, определяются на основе результатов экспериментов для конкретных технологических процессов, применяемых материалов и формируемых приборных структур. Очевидно, что использование таких моделей в других условиях, с другими технологическими нормами, материалами и структурами, может привести к неадекватным результатам приборно-технологического и схемотехнического моделирования. Таким образом, при переходе к новым проектным нормам возникает задача разработки новых, а также адаптации уже существующих физико-математических и электрических моделей для их использования в процессе проектирования технологических процессов, приборных структур, схемотехнических и системотехнических решений современной микроэлектроники. Кроме того, необходимо разработать соответствующие подходы и методы интеграции усовершенствованных моделей в состав программных средств проектирования в микроэлектронике.

Точность экстракции параметров физико-топологических моделей полупроводниковых приборов и структур является ключевой задачей для обеспечения надежного прогнозирования характеристик схемотехнических решений интегральных микросхем (ИМС). Адекватное описание требуется не только для вольт-амперных характеристик (ВАХ), но и для нелинейных

параметров прибора, таких как гармонические искажения. В связи с этим основа разрабатываемой электрической модели должна быть физически обоснованной, т. е. ее параметры должны быть тесно связаны с электро-физическими и конструктивными параметрами исследуемой приборной структуры.

Методика экстракции параметров моделей BSIM4 и HiSIM2

Для экстракции параметров модели BSIM4 используются три набора транзисторов: с фиксированной шириной канала и разными длинами; с фиксированной максимальной длиной канала и разными значениями ширины; с минимальной длиной канала и разными значениями ширины. В случае экстракции параметров модели HiSIM2 используются аналогичные группы приборов с различными топологическими параметрами затвора.

Транзисторы больших размеров ($W \geq 5$ мкм, $L \geq 5$ мкм) используются для экстракции паразитных сопротивлений и параметров, которые не влияют на моделирование эффектов узкого и короткого канала: параметры модели подвижности, пороговое напряжение или поверхностные потенциалы, коэффициенты, описывающие влияние подложки.

Набор транзисторов с максимальной шириной и различной длиной канала используется для экстракции параметров, входящих в выражения, описывающие короткоканальные эффекты. Приборы с максимальной длиной канала и разными значениями ширины используются для экстракции параметров, характеризующих эффекты узкого канала. Другие транзисторы с минимальной длиной канала и различными значениями ширины используются для экстракции параметров, описывающих эффекты, связанные с малыми размерами.

Для экстракции параметров моделей BSIM4 и HiSIM2 рекомендуется измерять следующие характеристики для каждого транзистора:

– $I_C(V_{зи})$ при различных $V_{пи}$ и малом значении напряжения между стоком и истоком (линейная область, $V_{си} = 0,05$ В);

– $I_C(V_{си})$ при различных $V_{зи}$ и отсутствии смещения на подложке ($V_{пи} = 0$, линейная область и область насыщения);

– $I_C(V_{зи})$ при различных $V_{пи}$ и $V_{си} = V_{п}$ (область насыщения), где $V_{п}$ – напряжение питания;

– $I_C(V_{си})$ при различных $V_{зи}$ и $V_{пи} = V_{п}$ (линейная область и область насыщения), где $V_{п}$ – максимальное смещение подложки.

Для некоторых приборов также требуются измерения вольт-фарадных характеристик.

Для поиска значений параметров модели BSIM4 методом оптимизации рекомендуется использовать метод Ньютона-Рафсона или Левенберга-Марквардта для линеаризации нелинейной критериальной функции, а полученное линейное уравнение минимизировать методом наименьших квадратов [1, 2]. При экстракции параметров модели HiSIM2 применяется комбинация метода Левенберга-Марквардта и генетического алгоритма.

Согласно стратегии экстракции параметров моделей BSIM4 и HiSIM2 не все параметры экстрагируются из вольтамперных характеристик исследуемых МОП-транзисторов. Некоторые из них определяются на основании данных о технологическом маршруте их изготовления. Перед началом экстракции параметров для модели BSIM4 обязательно задаются следующие параметры: толщина подзатворного диэлектрика и его диэлектрическая проницаемость ($TOXE$, $TOXP$, $EPSROX$), концентрация легирующей примеси в канале ($NDEP$), температура ($TNOM$), длина и ширина канала по фотошаблону (L , W), глубина залегания p - n -переходов (XJ) [1–3].

Аналогичные параметры, характеризующие технологический маршрут изготовления и приборную структуру, должны быть определены и для модели HiSIM2. HiSIM2 является моделью МДП-транзистора, основанной на поверхностном потенциале, и не включает в себя пороговое напряжение в качестве параметра модели. В связи с этим, такие параметры прибора, как толщина оксида T_{ox} и концентрация примеси в подложке N_{sub} , играют значительную роль при определении характеристик прибора [4, 5].

Результаты экстракции параметров моделей BSIM4 и HiSIM2 для МОП-транзисторов, изготовленных по технологии, обеспечивающей минимальную длину канала 90 нм

Проведена экстракция параметров моделей BSIM4 и HiSIM2 для n -МОП-транзисторов, изготовленных по технологии, обеспечивающей минимальную длину канала 90 нм.

Используемая приборная структура n -МОП-транзистора с длиной канала 90 нм, результаты экспериментальных измерений вольтамперных характеристик которой получены в Microsystems Technology Laboratory [6], представлена на рис. 1.

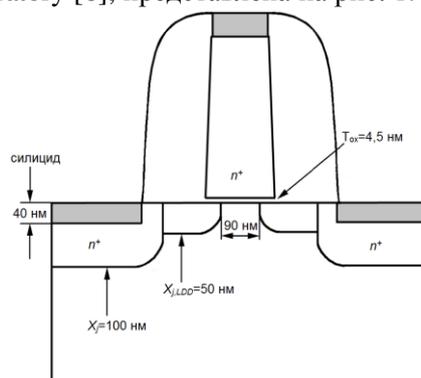


Рис. 1. Структура n -МОП-транзистора с длиной канала 90 нм

Для экстракции параметров моделей был использован набор МОП-транзисторов с длиной канала 90 нм, 130 нм, 180 нм, 500 нм, 1 мкм, 2 мкм, 5 мкм, 10 мкм и шириной канала 1 мкм. Вольтамперные характеристики МОП-транзисторов, используемые в процессе экстракции, получены в результате проведения натурных и компьютерных экспериментов посредством использования модуля приборного моделирования Atlas программного комплекса Silvaco после оптимизации диффузионно-дрейфовой модели [7].

Измерение и моделирование зависимостей $I_C(V_{зи})$ проводилось как в линейном режиме ($V_{си} = 50$ мВ), так и в режиме насыщения ($V_{си} = 1,2$ В) при различных смещениях на подложке ($V_{пи} = 0; -0,2; -0,4; -0,6; -0,8$ В). Измерение и моделирование зависимостей $I_C(V_{си})$ проводилось для различных напряжений на затворе ($V_{зи} = 0,6; 0,75; 0,9; 1,05; 1,2$) при отсутствии смещения ($V_{пи} = 0$ В) и при обратном смещении на подложке ($V_{пи} = -0,8$ В).

Некоторые этапы процедуры экстракции, выделенные разработчиками моделей и характеризующиеся одинаковыми условиями проведения, были объединены для достижения лучших результатов оптимизации параметров модели. Следует отметить, что этапы оригинальной процедуры повторялись в процессе экстракции.

Рис. 2 и 3 демонстрируют вольт-амперные характеристики МОП-транзисторов, рассчитанные с использованием экстрагированных параметров моделей BSIM4 и HiSIM2, и соответствующие экспериментальные данные. Очевидно, что вольт-амперные характеристики, полученные с использованием экстрагированных значений параметров моделей BSIM4 и HiSIM2, соответствуют результатам приборно-технологического моделирования и экспериментальным данным, что свидетельствует об эффективности предложенной методики экстракции и внесенных усовершенствований. Относительная погрешность схемотехнического моделирования с использованием экстрагированного набора параметров в сравнении с экспериментальными данными, составила не более 7 %.

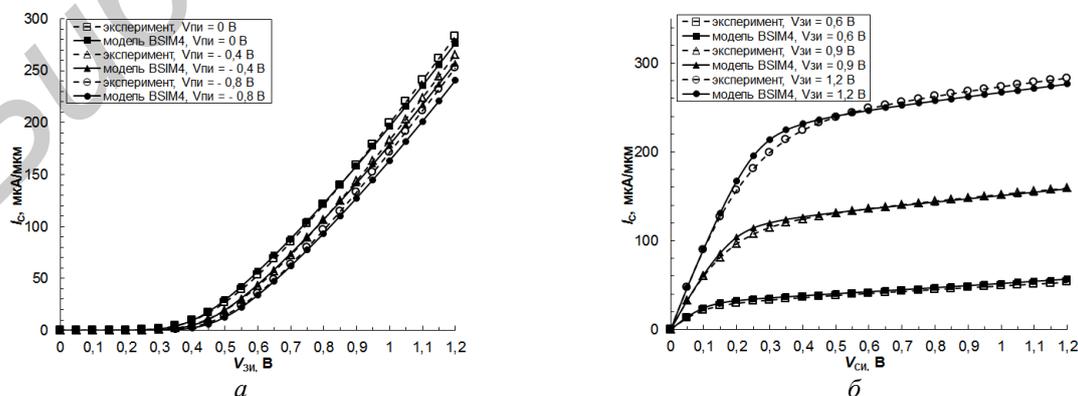


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики, рассчитанные на основе экстрагированного набора параметров модели BSIM4, и результаты соответствующих экспериментальных измерений: a – передаточные характеристики при $V_{си} = 1,2$ В; b – выходные характеристики при $V_{пи} = 0$ В

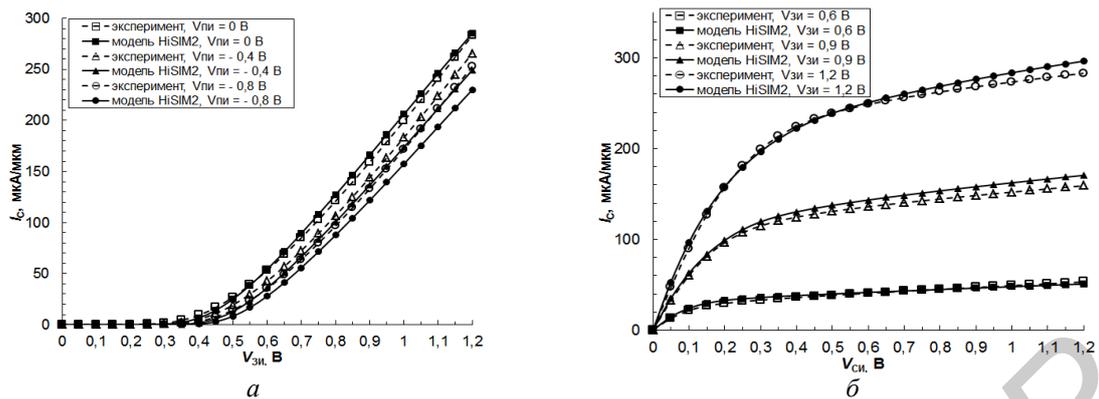


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики, рассчитанные на основе экстрагированного набора параметров модели HiSIM2, и результаты соответствующих экспериментальных измерений: *a* – передаточные характеристики при $V_{\text{СИ}} = 1,2 \text{ В}$; *б* – выходные характеристики при $V_{\text{ПИ}} = 0 \text{ В}$

Заключение

В качестве наиболее эффективных моделей, предназначенных для схемотехнического моделирования МОП-транзисторов стандартной конструкции, изготовленных по технологии, обеспечивающей минимальную длину канала 90 нм, выбраны модели BSIM4 и HiSIM2.

Разработана методика экстракции и идентификации параметров электрических моделей наноразмерных полупроводниковых приборов, основанная на применении методов оптимизации (генетический алгоритм, метод Левенберга-Марквардта и др.), включающая этапы компьютерного приборно-технологического моделирования статических и динамических характеристик; идентификации параметров моделей по результатам прямых измерений (при наличии возможности); оптимизации (верификации) значений SPICE-параметров с целью достижения требуемого соответствия результатов схемотехнического моделирования экспериментальным данным или данным приборного моделирования в среде программного комплекса компании Silvaco.

Относительная погрешность схемотехнического моделирования с использованием экстрагированного набора параметров моделей BSIM4 и HiSIM2 для *n*-МОП-транзисторов, изготовленных по технологии, обеспечивающей минимальную длину канала 90 нм по сравнению с экспериментальными данными, составила не более 7 %.

Список литературы

1. Денисенко В.В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и наноэлектронике. М.: Физматлит, 2010. 408 с.
2. BSIM4v4.7 MOSFET Model. User's Manual / C. Hu [et. al.]. Berkeley: Department of Electrical Engineering and Computer Sciences University of California, 2011. 184 p.
3. The HiSIM compact model family for integrated devices containing a surface-potential MOSFET core / H.J. Mattausch [et al.] // Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, 2008 (MIXDES 2008). P. 39–50.
4. Iino Y.A Trial Report: HiSIM-1.2 Parameter Extraction for 90 nm Technology // 2004 Workshop on Compact Modeling (WCM 2004). 2004. P. 147–150.
5. HiSIM 2.8.0 User's Manual / M. Miura-Mattausch [et al.]. Hiroshima: Hiroshima University, 2014. 113 p.
6. Well-Tempered Bulk-Si 90 nm NMOSFET Device / D. Antoniadis [et al.] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www-mtl.mit.edu/researchgroups/Well/>. – Дата доступа: 15.03.2017.
7. Чан Туан Чунг, Боровик А.М., Стемпичкий В.Р. Оптимизация параметров диффузионно-дрейфовой модели // Докл. БГУИР. 2014. № 8 (86). С. 11–17.

References

1. Denisenko V.V. Kompaktnye modeli MOP-tranzistorov dlja SPICE v mikro- i nanojelektronike. M.: Fizmatlit, 2010. 408 s. (in Russ.)
2. BSIM4v4.7 MOSFET Model. User's Manual / C. Hu [et. al.]. Berkeley: Department of Electrical Engineering and Computer Sciences University of California, 2011. 184 p.

3. The HiSIM compact model family for integrated devices containing a surface-potential MOSFET core / H.J. Mattausch [et. al.] // Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, 2008 (MIXDES 2008). P. 39–50.
4. Iino Y.A Trial Report: HiSIM-1.2 Parameter Extraction for 90 nm Technology // 2004 Workshop on Compact Modeling (WCM 2004). 2004. P. 147–150.
5. HiSIM 2.8.0 User's Manual / M. Miura-Mattausch [et. al.]. Hiroshima: Hiroshima University. 2014. 113 p.
6. Well-Tempered Bulk-Si 90 nm NMOSFET Device / D. Antoniadis [et. al.] [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www-mtl.mit.edu/researchgroups/Well/>. – Date of access: 15.03.2017.
7. Chan Tuan Chung, Borovik A. M., Stempickij V. R. Optimizacija parametров diffuzionno-drejfovoj modeli // Dokl. BGUIR. 2014. № 8(86). S. 11–17. (in Russ.)

Сведения об авторах

Стемпицкий В.Р., к.т.н., доцент, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники, Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Боровик А.М., аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ханько В.Т., магистрант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-88-90; +375-17-293-84-09
e-mail: borovik@bsuir.by;
Боровик Артур Михайлович

Information about the authors

Stempitsky V.R., PhD, associate professor, associate professor of the of micro- and nanoelectronics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Borovik A.M., PG student of micro- and nanoelectronics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Khanko V.T., master student of micro- and nanoelectronics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university of
informatics and radioelectronics
тел. +375-17-293-88-90; +375-17-293-84-09
e-mail: borovik@bsuir.by;
Borovik Artur Mikhailovich