

Экстракция параметров масштабируемой модели МОП-транзистора

М.Г. Красиков¹, В.В. Нелаев¹, О.А. Божаткин², В.В. Кунцевич², В.С. Сякерский²

¹Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», nvv@bsuir.by

²Научно-технический центр «Белмикросистемы» Завода полупроводниковых приборов Научно-производственного объединения «Интеграл»

Аннотация — Представлены алгоритмы и программное обеспечение для экстракции параметров SPICE моделей на основании результатов натурных или компьютерных экспериментов.

Ключевые слова — SPICE-параметры, экстракция, МОП транзистор, BSIM3 модель.

I. ВВЕДЕНИЕ

Адекватность результатов моделирования любых объектов (процессов) их реальному поведению определяется, в первую очередь, полнотой физических эффектов, которые учитываются при создании конкретной модели, что, как следствие, требует значительного количества параметров, имеющих определенный физический смысл или же выступающих в качестве подгоночных коэффициентов для получения заданного соответствия между результатами моделирования и эксперимента. В моделях приборов микроэлектроники, используемых в SPICE-подобных программах схемотехнического проектирования, таковыми являются так называемые SPICE-параметры. Следует подчеркнуть, что процедура расчета (экстракции) SPICE-параметров моделей приборов является основополагающим, связующим звеном между этапами физико-технологического и схемотехнического проектирования. Очевидно, что в математическом смысле проблема экстракции SPICE-параметров является нетривиальной задачей на многофакторную (в современных моделях приборов содержится более сотни SPICE-параметров!) условную оптимизацию, успешное решение которой обеспечивается правильным использованием соответствующих оптимизационных методов и алгоритмов ее (экстракции) реализации.

В настоящее время задача экстракции SPICE-параметров является как никогда актуальной для *fabless* производства интегральных микросхем, когда предприятия микроэлектронной промышленности предоставляют проектировщикам набор руководств и правил, включающий всю информацию (в том числе и

SPICE-параметры моделей приборов, входящих в состав проектируемой ИМС), необходимую для создания нового изделия (*design kits*).

Традиционным способом экстракции SPICE-параметров моделей приборов микроэлектроники является использование специализированных программно-аппаратных комплексов, которые позволяют осуществлять эту процедуру как на основании экспериментальных измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ) приборов, так и на основании результатов расчетов, например, моделирования характеристик разрабатываемого прибора. Таким стандартным и широко используемым в электронной промышленности аппаратно-программным комплексом является IC-CAP – разработка компании Agilent [1]. В аппаратную (измерительную) часть IC-CAP входит широкий спектр измерительного оборудования, а программная составляющая включает SPICE-модели и алгоритмы экстракции их параметров. Компании занимающиеся разработкой программного обеспечения для сквозного проектирования в области микроэлектроники также предлагают свои решения данной проблемы. Так, в состав программного комплекса проектирования в микроэлектронике компания Silvaco [2] входит соответствующий модуль UTMOST [3], а в состав комплекса компании Synopsys – модуль AURORA [4]. Эти модули интегрированы с соответствующими программными продуктами, предназначенными для проектирования в других областях микроэлектроники (технологии и схемотехники). К сожалению, IC-CAP, UTMOST и AURORA являются дорогостоящими «закрытыми» коммерческими продуктами, что ограничивает возможность их широкого использования при проектировании изделий микроэлектроники. В связи с этим разработка собственного программного комплекса экстракции SPICE-параметров, в котором используются передовые методы и средства решения проблемы оптимизации, является актуальной задачей для дизайн-центров микроэлектроники. В частности,

предлагаемый комплекс может быть использован для предварительной оценки результатов проектирования прибора/схемы в мелких и средних компаниях (Small and Middle Enterprises, SME) для которых не всегда доступны коммерческие версии таких продуктов. Комплекс может быть использован и в научных исследованиях, а также при подготовке инженеров-проектировщиков в университетах и в процессе повышения квалификации проектировщиков-профессионалов.

II. ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЭКСТРАКЦИИ SPICE-ПАРАМЕТРОВ

Рассмотрим отличительные характеристики SPICE-параметров различных физических моделей МОП-транзисторов. При разработке моделей, описывающих поведение приборов, учитываются физические процессы, протекающие в них, а при их математическом описании вводятся упрощающие предположения с целью сокращения необходимых компьютерных ресурсов. Примерами физических моделей приборов являются модели BSIM3 [5, 6] (BSIM4 [7]), EKV [8], HSPICE Level 28 [9]. Общепринятой и ставшей стандартной при проектировании устройств микроэлектроники является модель МОП-транзисторов BSIM3 [6], в рамках которой возможен учет разнообразных физических эффектов, проявляющихся в современных приборах, изготавливаемых по субмикронной технологии.

Модель BSIM3 характеризуется совокупностью параметров, часть которых имеет определенный физический смысл, совпадающий с некоторыми параметрами технологии формирования структурных областей проектируемого прибора или его электрических характеристик. Другая часть SPICE-параметров модели приборов не имеет явного физического смысла и выступает лишь в качестве подгоночных коэффициентов. Так, например, параметры NCH (концентрация примесей в канале), NSUB (концентрация примесей в подложке) и XT (глубина залегания концентрации примеси в канале) характеризуют профили распределения примесей в области канала и подложки. Параметры TOX и XJ соответствуют толщине подзатворного диэлектрика и глубине залегания p-n-перехода в истоковых областях. Параметр VTН0 определяет пороговое напряжение транзистора с длинным каналом. К подстроечным параметрам относятся, например, коэффициенты K1, K2 (коэффициенты эффектов подложки первого и второго порядка, которые характеризуют наклон передаточной кривой до области сильной инверсии) и K3 (коэффициент, характеризующий эффекты, проявляющиеся в транзисторе с узким каналом).

Всего в модели BSIM3 содержится более 140 SPICE-параметров. При этом имеется возможность

описать одно и то же физическое явление в МОП-транзисторе разными параметрами, входящими в модель BSIM3. Так, учет эффекта влияния подложки на величину порогового напряжения описывается параметром GAMMA1. Этот эффект можно описать и с помощью параметра NCH. Указанное свойство SPICE-параметров в моделях МОП-транзисторов проявляется и при расчете таких характеристик прибора как подвижность носителей и сопротивление области стока.

Таким образом, определенным недостатком модели МОП-транзисторов BSIM3 является неоднозначность результатов использования совокупности параметров модели. Использование же разных параметров модели, которые описывают одну и ту же характеристику прибора может привести к проявлению «конфликта» при проведении моделирования прибора/схемы и, как следствие, к использованию значений параметров модели, заданных по «умолчанию». Таким образом, одной из важных задач, которые решаются в процессе проведения процедуры экстракции SPICE-параметров является определение их «необходимого и достаточного» набора, который позволил бы получить результаты моделирования с заданной точностью.

Как показано выше, проблема экстракции SPICE-параметров модели прибора по сути является задачей на оптимизацию, сводящейся к поиску минимума интегральной величины ошибки (погрешности) между результатами моделирования и натурального (или компьютерного) эксперимента, где в качестве подгоночных коэффициентов выступают SPICE-параметры модели прибора.

Возможны различные способы вычисления величины интегральной погрешности. Так, при экстракции SPICE-параметров в среде комплекса IC-CAP [10] используются различные виды погрешности, основные из которых – абсолютная и относительная погрешности. Обычно, величина погрешности рассчитывается для каждой пары точек, соответствующих результатам эксперимента и моделирования с использованием экстрагированных SPICE-параметров, по совокупности которых определяется их среднее (или максимальное) значение. При расчете относительной (e_{rel}) ошибки используется и подход, альтернативный классическому, который заключается в том что ошибка определяется относительно максимальной из абсолютных значений величин эксперимента ($meas$) и результата моделирования ($simu$):

$$e_{rel}(i) = \left| \frac{I_{simu}(i) - I_{meas}(i)}{\max(|I_{meas}(i)|, |I_{simu}(i)|)} \right|, \quad (1)$$

где I_{simu} и I_{meas} – значения результатов моделирования и эксперимента соответственно для i -го результата мо-

делирования/эксперимента. Такой подход позволяет избежать ситуации, когда одно из значений измерения или расчета равно нулю или намного меньше другого.

III. СТРАТЕГИИ ПРОЦЕДУРЫ ЭКСТРАКЦИИ SPICE-ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Существует два основных подхода (стратегии), используемые при осуществлении процедуры экстракции SPICE-параметров моделей прибора: первый основан на результатах измерений/моделирования характеристик одного прибора, а другой базируется на результатах измерения/моделирования группы приборов. В первом подходе для достижения максимального соответствия результатам моделирования экспериментальным данным требуется меньшее количество SPICE-параметров, что упрощает процедуру экстракции. Однако, при таком подходе невозможно достоверное определение параметров, отвечающих за проявления эффектов, связанных с изменением геометрии прибора, например, в случае МОП-транзисторов - эффектов короткого и узкого каналов. Кроме того, вследствие использования в процедуре оптимизации небольшого числа параметров очевидно, что экстрагированные в таком подходе значения SPICE-параметров могут даже по порядку величины не соответствовать действительным величинам, соответствующим их физическому смыслу. В результате использование модели с такими SPICE-параметрами не гарантирует адекватного описания поведения этого же прибора при изменении его геометрических размеров.

С другой стороны, экстракция SPICE-параметров модели транзистора на основании результатов измерения группы приборов, изготовленных по одному технологическому маршруту, но различающихся геометрическими размерами, является более трудоемким процессом по сравнению с процедурой расчета SPICE-параметров одного прибора. Это связано с необходимостью более «тонкой» настройки параметров, что обусловлено геометрией прибора. В то же время, такой подход обладает неоспоримым достоинством, заключающемся в универсальности получаемых SPICE-параметров модели, которая позволяет одновременно описать всю группу приборов, изготовленных по одной технологии, но различающихся геометрическими размерами (так называемая масштабируемая модель).

Серьезной и критической проблемой, которая возникает при непосредственном проведении процедуры экстракции, является способ реализации самой стратегии экстракции. При решении этой проблемы также используются два подхода, которые условно можно назвать процедурами глобальной и локальной экстракции.

Суть процедуры глобальной экстракции заключается в выборе, на начальном этапе, максимально доступного набора SPICE-параметров, для каждого из которых задается свой диапазон допустимых значений этих параметров. Далее, с использованием всей совокупности имеющихся экспериментальных данных, проводится одновременная экстракция всех выбранных SPICE-параметров.

При использовании процедуры глобальной экстракции предполагается использование алгоритмов оптимизации, которые позволяют найти глобальный минимум. Такими возможностями обладают, например, генетические алгоритмы [11], [12]. Другой подход к реализации процедуры глобальной экстракции предложен в работе [13], где используется метод локальной оптимизации с использованием сложной системы барьерных функций, которые позволяют избежать «попадания» в локальный минимум.

Стратегия локальной экстракции предполагает раздельную, поэтапную настройку параметров модели. Из всей совокупности экспериментальных данных вначале выбираются определенные участки вольт-амперных характеристик прибора, для которых экстрагируемые на данном этапе SPICE-параметры являются наиболее значимыми (чувствительными), то есть оказывающими наибольшее влияние на результаты процедуры оптимизации. Совокупность алгоритмов, определяющих последовательность выбора экстрагируемых параметров и условий, на основании которых выбирается та или иная экспериментальная вольт-амперная характеристика или ее определенная область, с использованием которых оптимизируются экстрагируемые SPICE-параметры, называется стратегией экстракции. Та или иная стратегия экстракции выбирается в зависимости от используемой модели прибора и от заданной точности экстракции. В случае МОП-транзисторов на начальных этапах, как правило, проводится экстракция наиболее значимых параметров, то есть тех, которые оказывают наибольшее влияние на результаты моделирования всей совокупности экспериментальных характеристик приборов, а затем экстрагируются параметры, описывающие эффекты узкого или короткого канала МОП-транзистора.

Таким образом, разработка стратегии экстракции является нетривиальной задачей и требует глубоких знаний и профессиональной интуиции как в используемых моделях, так и физики работы прибора в целом.

IV. МЕТОДОЛОГИЯ

Здесь описываются разработанные алгоритмы и программное обеспечение, а также используемые оптимизационные методы, предназначенные для проведения экстракции SPICE-параметров на основании на-

турных или модельных (компьютерных) экспериментов.

Разработанное программное обеспечение позволяет проводить экстракцию параметров любых существующих моделей, используемых в стандартных программах схемотехнического моделирования (SPICE, Spectre, Eldo и др.).

Суть реализованного подхода заключается в использовании CIR-файлов, необходимых для SPICE-моделирования на всех этапах проведения экстракции, и общего файла с описанием параметров настраиваемой модели. В каждом CIR-файле используется опция `.INCLUDE <имя библиотеки>`. На рис. 1 показан графический интерфейс разработанного программного комплекса.

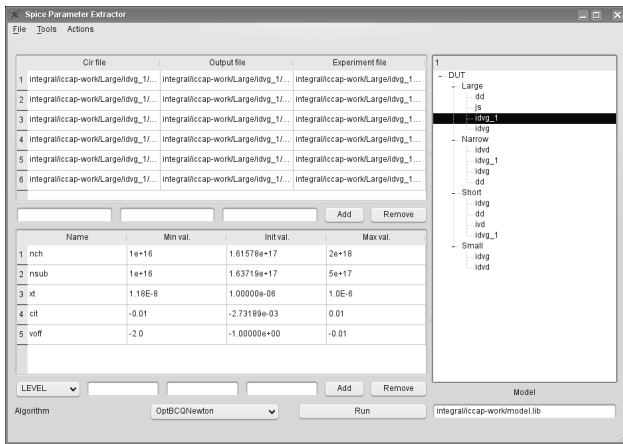


Рис. 1. Графический интерфейс разработанного программного комплекса, предназначенного для экстракции SPICE-параметров

В программном комплексе используется широкий набор современных алгоритмов условной и безусловной оптимизации, в том числе алгоритмы, реализующие методы Левенберга-Маркардта, Ньютона, сопряженных градиентов, метод прямого поиска и другие, а также генетический алгоритм поиска глобального минимума. В качестве входных параметров минимизируемой целевой функции выступают значения экстрагируемых параметров, а результатом расчета является величина отклонения результатов моделирования с использованием экстрагированных SPICE-параметров от экспериментальных данных. Кроме использования встроенных алгоритмов оптимизации, предусмотрена возможность интерактивной настройки параметров. Значение целевой функции может характеризоваться как стандартными средним абсолютным или средним относительным отклонением между экспериментальными и расчетными данными, либо как среднее значение модифицированной согласно выражению (1) относительной ошибки.

Для моделирования электрических характеристик прибора используется внешняя SPICE-подобная программа, которая может быть выбрана пользователем. В описываемых здесь расчетах использовалась программа NGSPICE [14].

Разработанный комплекс позволяет сформировать стратегию экстракции посредством ввода необходимых экспериментальных данных в табличном виде, описания схемы в виде CIR-файла, используемого при ее моделировании в SPICE-подобной программе, создания файлов с результатами моделирования, выбора экстрагируемых параметров на каждом этапе экстракции, а также их исходных значений и диапазонов изменения. Информация, относящаяся к сформированной стратегии, сохраняется в соответствующем XML-файле.

Функциональные возможности разработанного программного обеспечения (добавление этапов стратегии экстракции, выбор экстрагируемых параметров, ввод экспериментальных данных, визуализация данных и пр.) соответствуют основным характеристикам комплекса IC-CAP.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием описанной методологии и программного комплекса проведена экстракция SPICE-параметров в модели BSIM3v3 МОП-транзистора n-типа, который входит в состав библиотеки транзисторного уровня, разработанной для 0.8 мкм БиКМОП техпроцесса. Данная библиотека использовалась для проектирования телевизионного видеопроцессора LA8842, элементная база которого представлена на рис. 2.

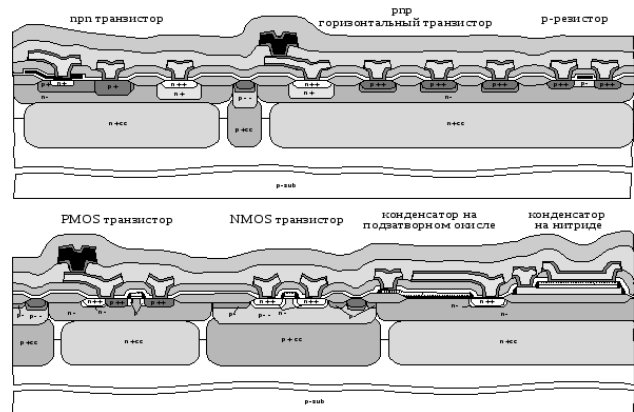


Рис. 2. Элементная база, используемая при изготовлении видеопроцессора LA8842

При экстракции параметров модели исследуемого транзистора применялась стратегия групповой локальной экстракции, которая предполагает использование набора данных по 4-м транзисторам, изготовленных по одному технологическому процессу: тран-

зистор с «большим» каналом ($L_{max}=30$ мкм, $W_{max}=30$ мкм), с длинным каналом ($L_{max}=30$ мкм, $W_{min}=2$ мкм), с широким каналом ($L_{min}=0.8$ мкм, $W_{max}=30$ мкм) и с «малым» каналом ($L_{min}=0.8$ мкм, $W_{min}=2$ мкм).

Оптимальным набором для экстракции параметров масштабируемой модели является совокупность из 7-ми транзисторов со значениями длины ($L_{min}<L_a<L_{max}$) и ширины ($W_{min}<W_a<W_{max}$) канала [6].

В соответствии с используемым подходом локальной экстракции на начальном этапе проводится экстракция параметров из результатов измерений вольт-амперных характеристик транзистора с наибольшими размерами канала, что позволяет исключить влияние эффектов связанных с малыми размерами канала,

ра; $I_b(V_g)$ – зависимость тока подложки от напряжения на затворе; $I_d(V_d)$ – зависимость тока стока от напряжения на стоке.

Согласно выбранной стратегии не все параметры экстрагируются из вольт-амперных характеристик исследуемого МОП-транзистора. Некоторые из них определяются на этапе проектирования технологического маршрута их изготовления. Такими параметрами являются: TOX – толщина подзатворного диэлектрика, XJ – глубина залегания p-n-переходов исток-стоковых областей, RSH – удельное сопротивление исток-стоковых областей.

Вначале осуществляется экстракция технологических параметров, таких как NCH, NSUB, XT и других

Таблица 1

Этапы используемой стратегии экстракции

Параметры МОП транзистора (W, L)	Вид измеряемой характеристики	Параметры для экстракции
W_{max}, L_{max}	$I_d(V_g)$ до области сильной инверсии.	$V_{off}, N_{factor}, N_{ch}, N_{sub}, X_t, C_{it}$
	$I_d(V_g)$ в области сильной инверсии.	U_0, U_a, U_c, U_b
	$I_d(V_g), I_b(V_g)$	$A_{gs}, A_0, K_{eta}, Alpha_1, Beta_0$
	$I_b(V_b)$	I_s
W_{min}, L_{max}	$I_d(V_g)$ до области строгой инверсии.	$K_3, K_3b, W_{nfactor}$
	$I_d(V_g)$ в области строгой инверсии.	W_{int}, D_{wg}, D_{wb}
	$I_d(V_d)$ при фиксированных напряжениях на затворе.	Проводится оценочное моделирование с использованием рассчитанных параметров
	$I_b(V_g)$	B_0, B_1
W_{max}, L_{min}	$I_d(V_g)$ до области строгой инверсии.	$D_{vt0}, D_{vt1}, L_{voff}, L_{nfactor}, D_{vt2}$
	$I_d(V_g)$ в области строгой инверсии.	$L_{int}, R_{dsw}, P_{rwg}, P_{rwb}$
	$I_b(V_g)$	$P_{clm}, D_{rout}, Delta, P_{scbe}$
	$I_d(V_d)$ при фиксированных напряжениях на затворе.	$Alpha_0, L_{beta0}, V_{sat}, La_0$
W_{max}, L_{min}	$I_d(V_g)$ в области строгой инверсии.	W_{rdsw}
	$I_d(V_d)$ при фиксированных напряжениях на затворе.	W_{wl}

например, DIBL(Drain-induced barrier lowering)-эффект. Таким образом, вначале определяются параметры, которые влияют на результат моделирования характеристик всей группы прибора, а затем экстрагируются параметры, отвечающие за более тонкие эффекты, проявляющиеся при уменьшении геометрических размеров прибора. В таблице 1 приведены этапы используемой стратегии экстракции. В этой таблице использованы следующие обозначения: $I_d(V_g)$ – зависимость тока стока от напряжения на затворе транзисто-

(см. табл. 1). Далее экстрагируются параметры, используемые при расчете подвижности носителей заряда в электрическом поле (U_0 – коэффициент подвижности, U_A – коэффициент деградации подвижности первого порядка, U_B – коэффициент деградации подвижности второго порядка, U_C – эффект влияния подложки на коэффициент деградации подвижности) и далее согласно перечню параметров, указанных в табл. 1.

Таблица 2

Сравнение значений экстрагированных SPICE-параметров МОП-транзистора

Название и описание параметра	Значения, полученные с использованием собственного комплекса	Значения, полученные с использованием комплекса IC-CAP
RDSW - переходное сопротивление сток/исток-канал (Ом/м)	46813.9	1880
K3 - коэффициент узкоканального эффекта.	10.9032	26.17
K3B - коэффициент влияния подложки на k3 (B^{-1}).	-5.24443	-0.2249
U_0 - подвижность при нормальной температуре (m^2/Vc).	606.19	489.8
AGS - коэффициент влияния смещения затвора на заряд подложки (B^{-1}).	0.164663	0.12807
VSAT - максимальная скорость носителей заряда в канале.	70094.6	7.012E+004
A0 - коэффициент зависимости заряда подложки от длины канала.	2.1698	1.491
LINT - технологический уход длины канала (м).	1.71047e-07	1.874E-007
WINT - технологический уход ширины канала (м).	4.63238e-07	4.674E-007

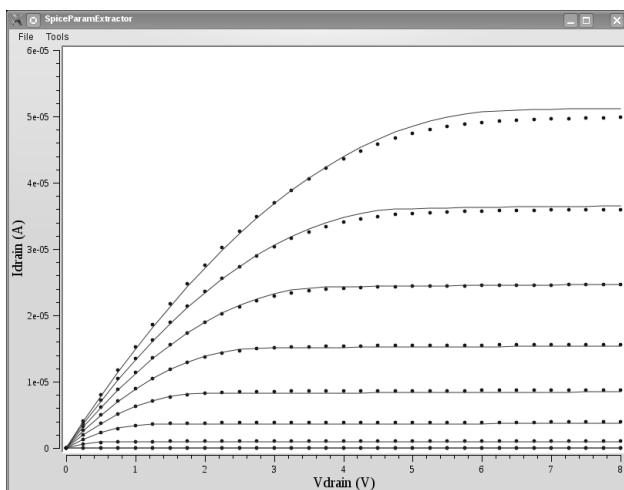


Рис. 4. Зависимость $V_d(I_d)$ для транзистора с длинным каналом ($L_{\max}=30$ мкм, $W_{\min}=2$ мкм)

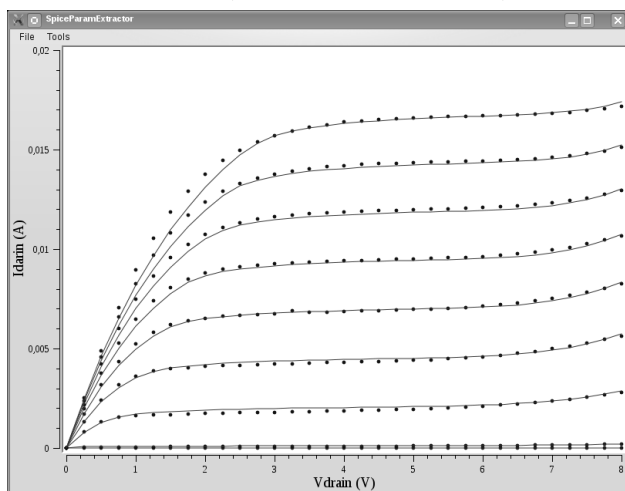


Рис. 5. Зависимость $V_d(I_d)$ для транзистора с малым каналом ($L_{\min}=0.8$ мкм, $W_{\min}=2$ мкм)

Параметры, полученные на каждом последующем этапе проведения процедуры экстракции, могут оказывать влияние на результат моделирования характеристик прибора с использованием параметров, экстрагированных на предыдущем этапе. По этой причине необходимо использовать итерационный алгоритм: после проведения экстракции параметров на каждом шаге следует возвращаться на предыдущие этапы с целью коррекции получаемых значений параметров. В таблице 2 приведены сравнительные данные по 9-ти наиболее значимым из 45 SPICE-параметров, экстрагированных с использованием аппаратно-программного комплекса IC-AP и описываемого здесь программного комплекса. Эти данные показывают удовлетворительное согласие сравниваемых результатов.

На рис. 4 и 5 приведены вольт-амперные характеристики, измеренные на тестовых образцах, и соответ-

ствующие результаты моделирования с использованием экстрагированных SPICE-параметров модели (точками обозначены экспериментальные данные, а сплошные линии – результат моделирования с использованием экстрагированных параметров).

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие проводить экстракцию SPICE-параметров моделей приборов микроэлектроники на основании экспериментальных или рассчитанных данных. Проведена экстракция 45-ти SPICE-параметров BSIM3v3 модели МОП-транзистора n-типа. Получены параметры масштабируемой модели прибора. Значения экстрагированных параметров удовлетворяют величинам, соответствующим заложенному в них физическому смыслу. Результаты моделирования вольт-амперных характеристик исследованного МОП-транзистора с использованием экстрагированных параметров удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] <http://www.agilent.com>.
- [2] <http://silvaco.com>.
- [3] http://www.simucad.com/products/model_extraction/ut-most.html.
- [4] http://www.europractice.stfc.ac.uk/vendors/snps_tcad_aurora.pdf.
- [5] <http://www-device.eecs.berkeley.edu/~bsim3/>.
- [6] Y. Cheng, et al., "BSIM3v3 Manual," University of California, Berkeley, 1995.
- [7] <http://www-device.eecs.berkeley.edu/~bsim3/bsim4.html>.
- [8] <http://legwww.epfl.ch/ekv/>.
- [9] <http://www.synopsys.com/community/interoperability/pages/hspice.aspx>.
- [10] Agilent 85190A IC-CAP 2008 User's Guide.
- [11] Красиков М.Г. Экстракция SPICE-параметров с использованием генетических алгоритмов // Доклады БГУИР. 2009. №2 (40). С. 86-91.
- [12] Watts J. Bittner C. Heaberlin D. Hoffmann J. Extraction of Compact Model Parameters for ULSI MOSFETS Using a Genetic Algorithm // Tech. Proc. of the 1999 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems (MSM 99). 1999. Chap.6. P. 176-179.
- [13] Y. Mahotin and E. Lyumkis Automatic BSIM3/4 Model parameter extraction with penalty functions // Technical Proceedings of the 2004 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show. 2004. V. 2. P. 113-118, 2004.
- [14] <http://ngspice.sourceforge.net/>.