

УДК 621.382

ЭКСТРАКЦИЯ SPICE-ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

М.Г. КРАСИКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 3 ноября 2008

Представлено описание методологии экстракции параметров SPICE-модели *n*МОП-транзистора, основанной на результатах приборно-технологического моделирования. Приведен анализ исследования предложенной методологии на примере экстракции SPICE-параметров *n*МОП-транзистора. Показана эффективность использования генетических алгоритмов при решении задачи на оптимизацию в процедуре экстракции SPICE-параметров.

Ключевые слова: микроэлектроника, проектирование, технология, прибор, физические модели, экстракция, SPICE-модель, генетический алгоритм, оптимизация.

Введение

Эффективность применения систем автоматизированного проектирования (САПР) в микроэлектронной промышленности во многом определяется адекватностью используемых в них моделей. Ядро современных САПР составляют физические модели процессов и явлений, точность и надежность которых проверяется сравнением с экспериментальными данными. В состав математического обеспечения этих моделей входят параметры, имеющие, как правило, определенный физический смысл (например, в технологических САПР — это коэффициенты диффузии примесей, в схемотехнических — пороговое напряжение МОП-транзистора). Базовыми программными средствами, используемыми в приборно-технологическом проектировании, в которых реализуются указанные физические модели, являются SUPREM и PISCES, модификации которых входят, например, в состав программных модулей ATHENA и ATLAS компании Silvaco, одного из мировых лидеров в сфере разработки систем проектирования в микроэлектронике [1]. Основой схемотехнических САПР являются SPICE-подобные программы, которые входят в состав программных пакетов таких компаний как Cadence, Mentor Graphics, Synopsys.

При разработке нового или модификации существующего прибора проводится моделирование технологического маршрута, на основании результатов которого разработчик получает информацию о геометрии моделируемой структуры и о профилях распределения концентрации легирующих примесей в ней. Эта информация является входной для моделирования электрических характеристик проектируемой приборной структуры. В этой процедуре приборно-технологического проектирования используются как модели отдельных технологических процессов (имплантации, диффузии и др.), так и модели транспорта носителей заряда в структуре при расчете электрических параметров разрабатываемого прибора. На следующем этапе (схемотехнического проектирования), используются физико-топологические SPICE-модели приборов. В основе SPICE-моделей лежат параметры (так называемые SPICE-параметры), которые могут иметь определенный физический смысл либо выступать в качестве подстроечных коэффициентов, позволяющих достичь максимального соответствия рассчитанных вольтамперных характеристик (ВАХ) прибора/схемы экспериментальным данным. На этапе перехода от техно-

логического моделирования к схемотехническому проводится уточнение параметров SPICE модели (экстракция SPICE-параметров), что в дальнейшем используется при расчете электрических характеристик конкретного прибора.

В процессе экстракции SPICE-параметров используются результаты либо измерений тестовых образцов, либо расчета их электрических характеристик. При этом с использованием специальных алгоритмов осуществляется подбор (определение) таких значений SPICE-параметров, при которых результат моделирования наилучшим образом соответствует эксперименту. Одним из способов проведения процедуры экстракции является использование специальных программно-аппаратных комплексов, которые позволяют проводить как натурные измерения реальных приборов, так и осуществлять экстракцию параметров SPICE-моделей на основании результатов измерений. Таким широко используемым в промышленности аппаратно-программным комплексом является IC-CAP — разработка компании Agilent, аппаратная часть которой позволяет использовать широкий спектр измерительного оборудования, а программная составляющая включает в себя наиболее распространенные SPICE-модели и алгоритмы экстракции их параметров. Комплекс IC-CAP является стандартом для предприятий электронной промышленности. Следует отметить, что IC-CAP является дорогостоящим коммерческим продуктом, что затрудняет его широкое использование разработчиками изделий микроэлектроники. Основной целью, промежуточные результаты которой представлены в данной работе, является разработка собственного программного комплекса экстракции SPICE-параметров.

Методология экстракции SPICE-параметров

Существуют два основных подхода [2] к экстракции параметров SPICE-моделей: экстракция параметров на основании результатов измерения характеристик одного либо группы приборов.

В случае экстракции параметров на основании результатов измерения характеристик одного прибора может быть достигнуто хорошее соответствие результатов моделирования экспериментальным (рассчитанным) данным. Однако при таком подходе невозможно достоверное определение параметров, отвечающих за проявления эффектов, связанных с изменением геометрии прибора, например, эффектов короткого и узкого канала. В результате полученная модель с такими SPICE-параметрами не гарантирует адекватного описания того же прибора при изменении его геометрических размеров (например, длины или ширины канала МОП-транзистора).

Другой подход состоит в экстракции SPICE-параметров модели на основании результатов измерения группы приборов, различающихся геометрическими размерами. Такой подход предполагает проведение измерений (расчетов) электрических характеристик для группы приборов в условиях одинаковых режимов функционирования, что позволяет учесть эффекты, связанные с геометрией прибора. Следует отметить, что адекватность модели прибора с параметрами, полученными в таком подходе, при моделировании конкретного прибора может уступать адекватности результатам моделирования со SPICE-параметрами, экстрагированными на основании ВАХ одного прибора. Однако преимущество групповой экстракции заключается в том, что при схемотехническом проектировании разработчик может использовать одну универсальную модель для целой совокупности приборов.

Решение задачи экстракции SPICE-параметров модели прибора связано с использованием методов поиска минимума целевой функции (задача на оптимизацию). Минимизируемой функцией при этом выступает величина погрешности между результатами моделирования и натурального/компьютерного эксперимента, а в качестве аргумента — SPICE-параметры модели прибора.

Существуют, по крайней мере, две стратегии проведения оптимизации (экстракции) параметров SPICE-модели, различающиеся используемыми методами оптимизации — глобальная и локальная. Стратегия экстракции параметров с применением локальной оптимизации предполагает раздельную поэтапную настройку параметров модели. Из всех экспериментальных данных вначале выбираются определенные участки характеристик прибора, для которых экстрагируемые на данном этапе SPICE-параметры являются наиболее значимыми, т.е. оказываю-

щими наибольшее влияние на рассматриваемые ВАХ. Рекомендуемым способом проведения локальной экстракции является применение алгоритмов оптимизации на основе метода Ньютона в комбинации с методом наименьших квадратов при оценке целевой функции. Необходимым условием проведения экстракции SPICE-параметров с использованием методов локальной оптимизации является удовлетворение физическому смыслу каждого из них, а сама стратегия должна разрабатываться с учетом особенностей используемой модели, что является нетривиальной задачей.

Стратегия глобальной оптимизации подразумевает одновременную настройку максимального количества параметров с целью поиска таких значений, при которых достигается минимальная погрешность между результатами моделирования и экспериментальными данными (натурными или компьютерными). Для решения такой задачи используются методы адаптивного поиска минимума функции, разновидностью которых являются генетические алгоритмы оптимизации. При использовании таких алгоритмов параметры модели выступают в качестве подгоночных коэффициентов без учета заложенного в них физического смысла, в результате чего даже в случае успешного завершения процедуры оптимизации значения параметров модели могут оказаться нефизическими. Следует отметить, что такой подход является более простым в реализации, поскольку процесс экстракции производится за один этап.

Одним из способов поиска глобального минимума является применение генетических алгоритмов. В таком подходе, сформулированном Дж. Голландом [3], используются законы генетики и ее терминология, а поиск решения рассматривается как процесс эволюции начального решения к оптимальному. При этом произвольным или иным способом задаются пробные решения, удовлетворяющие граничным условиям задачи. Одно из таких решений называется хромосомой (как правило, алгоритм работает с бинарным представлением ее значения), а набор всех пробных решений – популяцией. В соответствии с принципом естественного отбора выбираются наиболее приспособленные особи, характеризующиеся значением целевой функции. После выбора наиболее приспособленных особей производится их "скрещивание", в результате чего пробные решения в новой популяции оказываются ближе к искомому минимуму. Процесс размножения (генерации) состоит в обмене участками хромосом относительно произвольно выбранной точки разрыва. Чтобы избежать решения, соответствующего локальному минимуму, используется операция мутации, которая заключается во внесении случайных изменений в результат скрещивания хромосом.

Основными критериями завершения выполнения генетического алгоритма, как правило, выступают либо нахождение решения, удовлетворяющего заданной погрешности, либо достижение заданного количества генераций.

Результаты экстракции параметров SPICE-модели *n*МОП-транзистора с использованием генетического алгоритма

Разработан программный комплекс, позволяющий проводить процедуру экстракции SPICE-параметров моделей приборов микроэлектроники на основании результатов измерения/расчета ВАХ прибора.

В основе алгоритмов программного комплекса лежат современные методы локальной и глобальной оптимизации. Проводится минимизация величины среднеквадратичного отклонения между результатами моделирования ВАХ прибора и эксперимента (расчета), которая представляется в виде функции, аргументами которой являются значения экстрагируемых SPICE-параметров модели.

Здесь представлены результаты двухмерного моделирования технологии формирования структуры *n*МОП-транзистора и расчета его вольтамперных характеристик. Полученные данные используются в качестве исходной информации при экстракции параметров физикотопологической модели МОП приборов BSIM3. В настоящее время модели BSIM3 и BSIM4 являются стандартом при проектировании устройств микроэлектроники с различными технологическими нормами, в том числе и субмикронных. Для экстракции SPICE-параметров используются вольтамперные характеристики, рассчитанные для одного прибора с фиксированным значением геометрических размеров транзистора. Экстракция параметров проводится с применением метода поиска глобального минимума, основанного на генетическом алгоритме.

Моделирование технологического маршрута и расчет ВАХ исследуемой структуры проводилось с использованием модулей ATHENA и ATLAS, входящих в программный комплекс приборно-технологического проектирования компании Silvaco.

Структура n МОП-транзистора как результат моделирования технологического маршрута его изготовления представлена на рис. 1. На основании результатов моделирования технологии определяются значения параметров SPICE-модели n МОП-транзистора, зависящие от технологических режимов его формирования: TOX — толщина подзатворного диэлектрика, X_j — глубина залегания p - n -перехода, L — длина канала, $LDiff$ — длина области боковой диффузии.

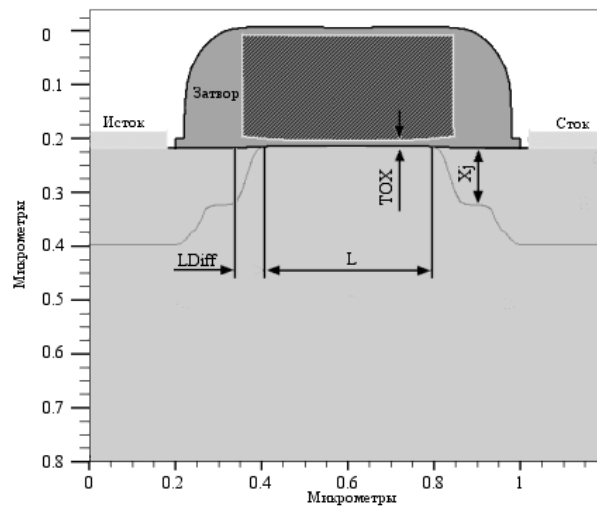


Рис. 1. Конечная структура n МОП транзистора как результат моделирования в программном комплексе Silvaco

Следующим этапом является моделирование ВАХ полученной структуры n МОП-транзистора: зависимости тока стока I_D (drain current) от напряжения на затворе V_G (gate bias), а также зависимость тока стока I_D от напряжения на стоке V_D при фиксированном напряжении на затворе V_G . Результаты моделирования указанных характеристик используются на этапе экстракции параметров физико-топологической модели n МОП-транзистора BSIM3.

Следует отметить, что в случае двухмерного моделирования в среде программного модуля ATLAS ширина канала, используемая по умолчанию, составляет 1 мкм (SPICE-параметр W). SPICE-моделирование прибора проводилось с использованием программы NGSPICE. Режимы моделирования электрических характеристик прибора с использованием SPICE-модели в процессе экстракции параметров соответствовали режимам, используемым при расчете в модуле ATLAS.

Результат моделирования ВАХ n МОП-транзистора с использованием параметров, которые были определены по результатам технологического моделирования (все остальные значения SPICE-модели BSIM3 использовались по умолчанию), и результат приборного моделирования до экстракции приведены на рис. 2. Очевидно несоответствие между результатами SPICE-моделирования и результатами, полученными при моделировании в модуле ATLAS.

Для экстракции SPICE-параметров была выбрана модель BSIM n MOS, параметры которой приведены на официальном сайте разработчиков. Для определения значимых параметров используемой модели проводился анализ чувствительности, на основании результатов которого параметры, не оказывающие влияния на результаты моделирования выбранных ВАХ, были удалены из списка экстрагируемых. В конечном итоге проводилась экстракция 35-ти SPICE-параметров в модели BSIM3 n MOS.

Сравнение результатов моделирования вольт-амперных характеристик прибора, полученных с использованием параметров модели BSIM3, после экстракции с результатами моделирования в модуле ATLAS приведено на рис. 3. Средняя относительная ошибка составляет 13%.

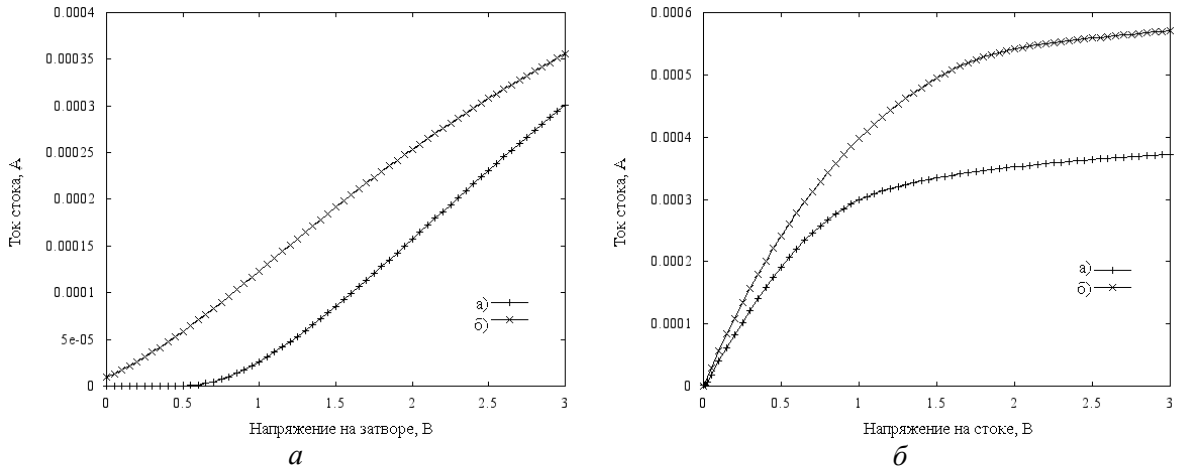


Рис. 2. Результаты моделирования BAX n МОП-транзистора до экстракции: a — зависимость $I_D(V_G)$; b — зависимость $I_D(V_D)$, при фиксированном значении V_G ; кривая a — результат моделирования в модуле ATLAS, b — результат SPICE-моделирования в программе NGSPICE):

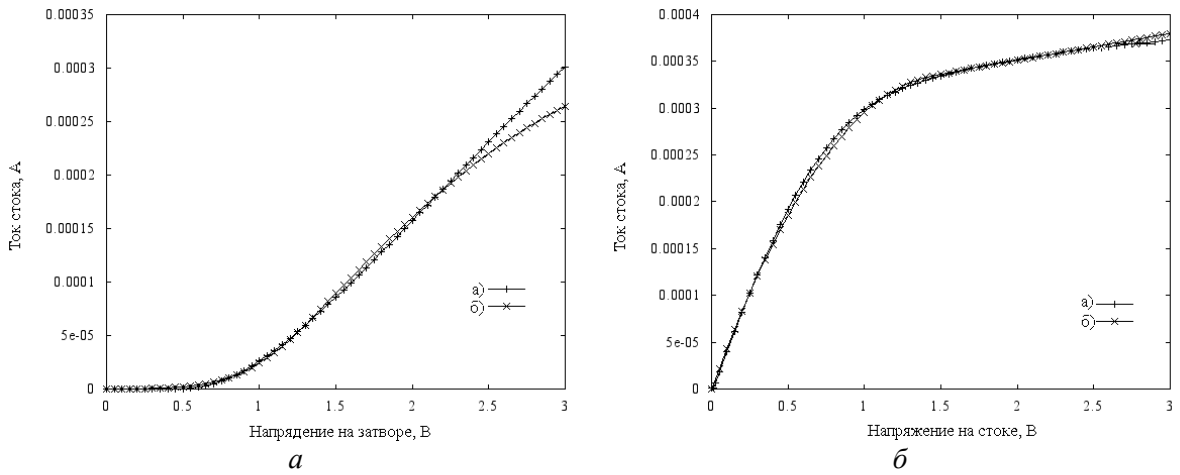


Рис. 3. Результаты моделирования BAX n МОП-транзистора после экстракции: a — зависимость $I_D(V_G)$; b — зависимость $I_D(V_D)$, при фиксированном значении V_G .

Приведем основные параметры используемого генетического алгоритма, входящего в состав библиотеки GALib. Следует отметить, что генетические алгоритмы относятся к методам случайного поиска и поэтому не существует четкой корреляции между выбранными параметрами алгоритма и полученным решением. Размер популяции был задан вдвое превышающим количество экстрагируемых параметров (т.е. 64). Число популяции связано с длиной используемой хромосомы. При проведении экстракции параметров установлено, что наилучший результат достигается с использованием хромосомы длиной 16 бит. Коэффициент скрещивания, определяющий вероятность воспроизводства потомства родительской пары хромосом, задан равным 0,8, что соответствует вероятности 80% (обычно эта вероятность находится в диапазоне 80–95%). Коэффициент мутации, определяющий вероятность внесения произвольного изменения в хромосоме–потомке, установлен равным 0,5% (обычно эта величина находится в диапазоне 0,5–1%). Критерий завершения процедуры экстракции — достижение генотипом (набором возможных решений) 500 генераций (итераций).

Заключение

Разработаны алгоритм и программный комплекс для реализации процедуры экстракции SPICE-параметров приборов микроэлектроники, основанные на генетическом методе оптимизации. В рамках предложенного подхода проведено моделирование технологического маршрута формирования nМОП-транзистора и его вольтамперных характеристик. На основании полученных результатов проведена экстракция 35-ти SPICE-параметров модели BSIM3 nМОП-транзистора. Погрешность результатов моделирования ВАХ nМОП-транзистора с использованием экстрагированных значений SPICE-параметров по сравнению с результатами компьютерного эксперимента в модуле ATLAS составляет ~13%, что свидетельствует об эффективности использованного подхода для экстракции SPICE-параметров.

Автор выражает благодарность проф. В.В. Нелаеву за постановку задачи и плодотворное обсуждение результатов.

SPICE-PARAMETERS EXTRACTION WITH USE OF GENETIC ALGORITHM

M.G. KRASIKOV

Abstract

The description of SPICE-parameters extraction methodology based on results of process/device simulation is presented. The effectiveness of the proposed methodology on the example of nMOS-transistor is shown. The applicability using of genetic algorithms in optimization routine within SPICE-parameter extraction procedure is proofed.

Литература

1. *Нелаев В.В., Стелмицкий В.П.* Основы САПР в микроэлектронике. Учебное пособие для курсов лекций и лаб. работ по дисциплине "Основы САПР в микроэлектронике". Минск, 2008.
2. *Cheng Y. et.al.* BSIM user's manual: BSIM3v3 Manual. University of California, Berkeley, 1995, P. 6–15.
3. *Holland J.* Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor MI: University of Michigan Press. 1975.