

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.382.3

Ханько  
Вероника Томашевна

Экстракция параметров электрических моделей полупроводниковых приборов  
с нанометровыми размерами элементов

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-41 80 03 «Нанотехнологии и наноматериалы  
(в электронике)»

---

Научный руководитель  
Стемпичкий Виктор Романович  
канд. техн. наук, доц.

---

Минск 2017

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Результат разработки технологии (изготовленный прибор либо результаты моделирования технологического маршрута его формирования, а также его электрических характеристик) связан с уровнем схемотехнического проектирования через процедуру экстракции (извлечения, определения) SPICE-параметров в рамках конкретной модели прибора. Суть процедуры экстракции SPICE-параметров заключается в определении такого их набора, использование которого при схемотехническом моделировании в среде SPICE-подобных программ обеспечивает адекватность экспериментальным данным. Экстракция параметров SPICE-моделей является неотъемлемым этапом разработки конечных микросистемных устройств. Особенно актуальной задача экстракции SPICE-параметров является для предприятий электронной промышленности, которые предоставляют сторонним разработчикам дизайн-киты (Process Design Kits, PDK) – набор руководств и правил, включающий всю информацию (в том числе и SPICE-параметры используемой элементной базы), необходимую для разработки новых устройств.

Стандартные программные средства проектирования и моделирования в микроэлектронике основаны на использовании многообразных физико-математических моделей процессов, имеющих место в приборных структурах. Уравнения, а также физические параметры этих моделей получены по результатам экспериментов с конкретными технологическими процессами, материалами и структурами. Очевидно, что использование таких моделей в других условиях, с другими технологическими нормами, материалами и структурами, может привести к неадекватным результатам моделирования и проектирования.

Таким образом, актуальной является задача, связанная с разработкой эффективных подходов и методов к экстракции и идентификации параметров электрических моделей для использования этих моделей в стандартных средствах проектирования изделий микроэлектроники при переходе к новым проектным нормам, конструктивным решениям и материалам.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы магистерской диссертации.** Актуальной является задача, связанная с разработкой эффективных подходов и методов к экстракции и идентификации параметров электрических моделей для использования этих моделей в стандартных средствах проектирования изделий микроэлектроники при переходе к новым проектным нормам, конструктивным решениям и материалам.

**Цели и задачи исследования.** Целью является разработка эффективных подходов к экстракции и идентификации параметров электрических моделей наноразмерных МОП-транзисторов, а также электрических моделей биполярного транзистора с изолированным затвором.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– анализ тенденций развития конструкции и технологических аспектов изготовления современных полупроводниковых приборов и ИМС, а также методов их схемотехнического моделирования;

– изучение электрических моделей наноразмерных МОП-транзисторов и приборов силовой электроники, а также разработка подходов к экстракции их параметров;

– апробация предложенной методики и стратегии экстракции параметров модели HiSIM2 на примере МОП-транзистора, изготовленного по технологии 90 нм, а также экстракции параметров электрической модели HiSIM-IGBT биполярного транзистора с изолированным затвором.

**Объект и предмет исследования.** В качестве объекта исследования выбраны электрические модели, а также параметры этих моделей, используемые в процессе экстракции. Предметом исследования являются методы экстракции параметров на основе результатов натуральных и компьютерных экспериментов, методы оптимизации параметров, развитие этих методов и средств их реализации для расширения возможностей стандартных программных комплексов.

**Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики.** Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники и в НИЛ 4.4 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники за время обучения в магистратуре. Основные результаты получены в рамках выполнения заданий республиканских программ научных исследований (ГПНИ):

– задание 3.1.02 ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» на тему «Разработка физико-топологических моделей описания воздействия

ионизирующих излучений на характеристики приборных структур и интегральных микросхем специального назначения» (ГБЦ 16-3034);

– задание 3.2.01 ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» на тему «Исследование и оптимизация посредством компьютерного моделирования режимов технологических процессов изготовления и электрических характеристик твердотельных структур диодов Шоттки и ДМОП-транзисторов, а также элементной базы радиационно-стойких высокочастотных и высоковольтных биполярных аналоговых интегральных микросхем. Разработка методов построения и экстракции параметров компактных моделей выделенных классов интегральных микросхем» (ГБЦ 16-3036).

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Предложенная методика экстракции параметров электрической модели HiSIM2, предназначенная для схемотехнического моделирования наноразмерных полупроводниковых приборов, основанная на использовании математических методов оптимизации, позволяет получить согласие с экспериментальными данными с относительной погрешностью не более 9 %.

2. Предложенная методика экстракции параметров электрической модели HiSIM-IGBT, предназначенная для схемотехнического моделирования приборов силовой электроники, учитывающая особенности конструкции БТИЗ, основанная на использовании математических методов оптимизации, позволяет получить согласие с экспериментальными данными с относительной погрешностью не более 7 %.

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Анализ тенденций развития конструкции и технологических аспектов изготовления современных полупроводниковых приборов и ИМС, а также методов их схемотехнического моделирования проводилось соискателем лично. Во время работы над диссертацией соискателем были изучены электрические модели наноразмерных МОП-транзисторов и приборов силовой электроники. Разработка подходов к экстракции их параметров проводилась совместно с научным руководителем кандидатом технических наук, доцентом Стемпицким В. Р.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты исследований, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных конференциях: 25-й международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния», 53-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, а

также опубликованы в виде соответствующих тезисов и материалов конференций.

**Публикации.** Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 3 опубликованных работах. Из них 2 статьи в сборниках материалов научных конференций, 1 тезис доклада.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из титульного листа, общей характеристики работы, введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 30 наименования, графического материала и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 68 страниц, в том числе 10 таблиц и 22 рисунка.

Библиотека БГУИР

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** описана методика масштабирования приборов микроэлектроники, а также особенности полупроводниковых приборов нанометрового масштаба.

Во **второй главе** рассмотрены электрическая модель полупроводниковых приборов, изготовленных с проектными нормами менее 100 нм, а также электрическая модель, предназначенная для схемотехнического моделирования приборов силовой электроники.

В **третьей главе** описаны стратегии экстракции и методы, применяемые для экстракции параметров электрических моделей полупроводниковых приборов.

В **четвертой главе** представлены результаты экстракции параметров электрических моделей семейства HiSIM.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучены современные тенденции развития полупроводниковых приборов микро- и наноэлектроники, проведен анализ методов моделирования их электрических характеристик, физико-топологических моделей наноразмерного МОП-транзистора и биполярного транзистора с изолированным затвором, подходов и методов экстракции их параметров.

2. В качестве эффективной модели, предназначенной для схемотехнического (SPICE) моделирования МОП-транзисторов стандартной конструкции, изготовленных по технологии, обеспечивающей минимальную длину канала 90 нм, выбрана модель HiSIM2. А в качестве эффективной модели, предназначенной для схемотехнического моделирования БТИЗ, выбрана модель HiSIM-IGBT. Апробирована методика экстракции и оптимизации параметров электрических моделей, основанная на применении методов оптимизации (генетический алгоритм, метод Левенберга-Марквардта).

Методика включает этапы:

- проведения измерений (компьютерного моделирования) статических и динамических характеристик;
- идентификации параметров моделей по результатам прямых измерений (при наличии возможности);
- оптимизации (верификации) рассчитанных значений SPICE-параметров с целью достижения требуемого соответствия результатов схемотехнического моделирования экспериментальным данным или данным приборного моделирования в среде программного комплекса компании Silvaco.

3. Усовершенствована стратегия экстракции путем объединения и повторного осуществления некоторых этапов исходной стратегии. С использованием усовершенствованной стратегии проведена процедура экстракции параметров модели HiSIM2 для *n*-МОП-транзистора с длиной канала 90 нм. Относительная погрешность схемотехнического моделирования с использованием экстрагированного набора параметров в сравнении с экспериментальными данными составила не более 9 %. Также была проведена процедура экстракции параметров модели HiSIM-IGBT для биполярного транзистора с изолированным затвором. Относительная погрешность схемотехнического моделирования с использованием экстрагированного набора параметров в сравнении с экспериментальными данными составила не более 7 %.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

[1-А] Ханько, В. Т. Электрические модели HiSIM для схемотехнического моделирования интегральных микросхем / В. Т. Ханько, В. Р. Стемпицкий // ФКС XXV: материалы конференции. – Гродно : ГрГУ, 2017 – С. 156–158.

[2-А] Ханько В. Т. Электрическая модель 90-нанометрового МОП-транзистора / В. Т. Ханько, А. М. Боровик, В. Р. Стемпицкий // Доклады БГУИР. – Минск : БГУИР, 2017 – С. 65–70.

[3-А] Ханько В. Т. Электрическая модель HiSIM2 для схемотехнического моделирования интегральных микросхем / В. Т. Ханько // Тезисы докладов XV Белорусско-российской научно технической конференции «Технические средства защиты информации». – Минск : БГУИР, 2017 – С. 105–106.