

На правах рукописи

Усачев Николай Александрович

**ЭЛЕМЕНТЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БЛОКИ
КРЕМНИЙ-GERМАНИЕВЫХ БИКМОП
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПРИЕМО-
ПЕРЕДАЮЩИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Автор:



Москва – 2015 г.

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском
ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель: Кандидат технических наук, доцент
Елесин Вадим Владимирович

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
МГТУ им Н.Э. Баумана
Борзов Андрей Борисович

Кандидат технических наук,
зам. начальника отдела
ОАО «НИИМА «Прогресс»
Репин Владимир Валерьевич

Ведущая организация: ОАО «НИИ ТП»

Защита состоится 13 апреля 2015 года в 14 час. 00 мин. на
заседании диссертационного совета № Д212.130.02 в Национальном
исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу 115409,
г.Москва, Каширское шоссе, 31, тел. (499) 323-91-67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ
МИФИ и на сайтах: www.ods.mephi.ru и www.vak.ed.gov.ru

Автореферат разослан «____» _____ 2015 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в
одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



П.К. Скоробогатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации

Одним из основных направлений развития отечественной электронной промышленности на период до 2020 года является создание нового поколения изделий твердотельной СВЧ-электроники для аппаратуры аэрокосмического, ядерного, научного, промышленного и специального назначения.

Появление и развитие субмикронных кремний-германиевых (SiGe) БиКМОП-технологий с граничными частотами единичного усиления гетероструктурных биполярных транзисторов (ГБТ) до 200 ГГц и более открывает широкие возможности по их использованию в перспективной приемо-передающей аппаратуре специального назначения сверхвысокочастотного (СВЧ) и миллиметрового диапазона. Совмещение полного набора функций СВЧ приемо-передающего тракта с процессором обработки и памятью на одном кристалле является возможным при наличии набора пассивных и активных СВЧ-элементов и функциональных блоков (ФБ) в составе технологической библиотеки SiGe БиКМОП технологии.

В связи с возросшей необходимостью импортозамещения актуальной является задача создания и развития отечественных SiGe БиКМОП технологических процессов для разработки СВЧ приемопередающих интегральных микросхем (ИМС). Между тем, имеющиеся модели МОП-транзисторов (МОПТ) - основного активного элемента технологической библиотеки, ориентированы преимущественно на проектирование цифровых и низкочастотных аналоговых ИМС и не могут быть использованы при проектировании СВЧ функциональных блоков (ФБ). Необходимые пассивные элементы (масштабируемые высокочастотные индуктивности, микрополосковые линии передачи и др.), снабженные компактными моделями для САПР, охарактеризованными в СВЧ-диапазоне, как правило, отсутствуют. Применяемые на отечественных предприятиях методики экстракции параметров моделей СВЧ-элементов ориентированы в первую очередь на «классические» СВЧ -технологии на основе АЗВ5-соединений и в большинстве своем не могут быть применены без значительной коррекции для SiGe БиКМОП-технологии.

Отечественные центры проектирования, в большинстве своем, не располагают необходимой научно-методической базой и

лицензионными техническими средствами (системами) автоматизированного проектирования (САПР), позволяющими осуществлять оперативную разработку библиотек СВЧ-элементов для SiGe БиКМОП-технологий.

Современным подходом к проектированию СВЧ прямо-передающих ИМС, позволяющим существенно сократить необходимое количество итераций (в пределе до одной) является использование поставляемых полупроводниковой фабрикой функциональных блоков (ФБ, IP-блоков). Между тем, для отечественных КМОП и SiGe БиКМОП-технологий с проектными нормами уровня 0,25 мкм и ниже подобные ФБ отсутствуют.

В этой связи разработка моделей СВЧ-элементов SiGe БиКМОП технологических библиотек и развитие методов проектирования СВЧ-ФБ и ИМС для перспективной прямо-передающей аппаратуры специального назначения, является актуальной.

В представленной работе наибольшее внимание было уделено исследованиям в области создания СВЧ-ФБ коммутаторов сигналов (КС) и ступенчатых аттенуаторов (АТ) с повышенным уровнем линейности, предназначенных для управления амплитудой СВЧ-сигнала в тракте приемника и передатчика, симметрирующих преобразователей импеданса (СПИ) для построения широкой номенклатуры СВЧ прямо-передающих ИМС.

Состояние исследований по тематике

Вопросам исследования и проектирования элементов библиотек и ФБ для СВЧ прямо-передающих ИМС, выполненных по SiGe БиКМОП-технологии, посвящен ряд научно-технических работ зарубежных и отечественных авторов: Cressler J.D., Scheytt C.C., Rebeiz G.M., Kaynak M., Елесина В.В., Репина В.В., Назаровой Г.Н., Мухина И.И. и др.

Работы Cressler J.D. посвящены исследованиям и проектированию ФБ, выполненных по SiGe БиКМОП-технологии, предназначенных преимущественно для использования в составе прямо-передающих микросхем активных фазированных антенных решеток (АФАР) X-диапазона и выше: КС, фазовращателей, АТ, малошумящих усилителей, усилителей мощности, выполненных на SiGe ГБТ. Следует отметить, что в опубликованных материалах описание методик проектирования перечисленных СВЧ-ФБ либо

отсутствуют, либо освещены недостаточно для их практического применения. Вопросы создания СВЧ-элементов библиотек не рассмотрены. Представленные варианты реализации ориентированы в основном на SiGe БиКМОП-технологии ф.IBM (США), недоступную для использования большинством отечественных предприятий. Не рассмотрены вопросы системного проектирования и поведенческого моделирования СВЧ приемо-передающих ИМС.

Область исследований Scheytt С.С. сосредоточена на проектировании преимущественно аналоговых и аналого-цифровых ФБ, таких как операционные усилители, сигма-дельта модуляторы, фазовые детекторы, делители частоты, предназначенных для использования в составе аппаратуры для высокоскоростных сетей передачи данных.

Работы Rebeiz G.M. и Kaynak M. в большинстве своем посвящены исследованиям в области создания архитектурных решений и проектирования СВЧ-ФБ приемо-передатчиков АФАР, и не затрагивают методик схемотехнического проектирования КС на МОПТ с повышенной верхней границей линейности амплитудной характеристики.

В научных трудах Елесина В.В., Репина В.В., Назаровой Г.Н., Мухина И.И. рассмотрены вопросы проектирования и исследований СВЧ-ФБ коммутаторов сигнала, фазовращателей и аттенуаторов, выполненных по SiGe БиКМОП-технологии; представлены методики оптимизации малосигнальных параметров КС на МОПТ. Между тем, не рассмотрены вопросы повышения линейности КС на МОПТ.

Целью диссертации является разработка моделей СВЧ-элементов и развитие методов автоматизированного проектирования функциональных блоков кремний-германиевых БиКМОП интегральных микросхем перспективной приемо-передающей аппаратуры специального назначения.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были решены следующие **задачи**:

1 Проведение сравнительного анализа типового состава и архитектур построения современных СВЧ приемо-передающих ИМС, выполненных по КМОП- и SiGe БиКМОП-технологиям с диапазоном рабочих частот до 3...5 ГГц, определение базового набора СВЧ-ФБ.

2 Разработка высокоуровневых поведенческих моделей, интегрированных в САПР, предназначенных для верификации параметрической и функциональной состоятельности СВЧ приемопередающих ИМС, формирования требований к параметрам отдельных СВЧ-ФБ.

3 Разработка библиотеки активных и пассивных СВЧ-элементов, снабженных компактными моделями для САПР, включающей высокочастотные спиральные индуктивности, изолированные МОП-транзисторы (МОПТ).

4 Разработка методик проектирования СВЧ-ФБ КС и АТ на их основе с повышенным уровнем верхней границы линейности амплитудной характеристики, СПИ, стойких к дозовому воздействию ионизирующего излучения.

5 Апробация и применение разработанных моделей и методик при проектировании ряда СВЧ-ФБ КС и АТ, СПИ, их реализация в рамках SiGe БиКМОП-технологии, а также проведение экспериментальных исследований изготовленных ФБ с целью подтверждения предъявляемых к их параметрам требований.

6 Применение разработанных СВЧ-элементов и ФБ при проектировании СВЧ приемопередающей ИМС с диапазоном рабочих частот до 3 ГГц, реализованной по кремний-германиевой БиКМОП-технологии.

Научная новизна работы

1 Разработана новая компактная модель изолированного МОПТ на основе ядра BSIM3v3, дополненная элементами для учета влияния подложки и карманов n- и p-типа, позволяющая проводить адекватный расчет СВЧ-параметров в диапазоне частот до 5 ГГц, в том числе значения вносимых потерь, адаптированная для использования в лицензионных САПР.

2 Разработана компактная модель симметрирующего преобразователя импедансов, учитывающая емкостную и индуктивную составляющие ЭМ-связи между обмотками, позволяющая проводить адекватный расчет малосигнальных

параметров, в том числе вносимых потерь, потерь на отражение в диапазоне до 20 ГГц, отличающаяся упрощенной процедурой экстракции параметров, и адаптированная для использования в лицензионных САПР.

3 Разработана методика проектирования СВЧ-ФБ КС «один-в-два» на МОПТ с повышенным значением верхней границы линейности амплитудной характеристики (Рлин) при накладываемых ограничениях на величину вносимых потерь, изоляции между каналами. В основу методики положен подход, заключающийся в оптимизации топологических размеров и количества последовательно включенных МОПТ на основе зависимостей вносимых потерь, изоляции, потерь на отражения, Рлин, полученных в результате схемно-топологического моделирования с использованием предложенной модели изолированного МОПТ. Методика позволяет реализовать КС на МОПТ с Рлин более 17 дБм (при напряжении питания 2,5В) и значении вносимых потерь менее 1 дБ на частоте 3 ГГц.

4 Разработана новая методика автоматизированного проектирования симметрирующих преобразователей импеданса в диапазоне рабочих частот по критерию наименьших вносимых потерь при накладываемых ограничениях на коэффициент трансформации и площадь, занимаемую на кристалле. Методика основана на оптимизации геометрических размеров индуктивностей первичной и вторичной обмоток, расстояния между ними исходя из частотных зависимостей вносимых потерь, полученных в результате ЭМ-моделирования.

Практическая ценность результатов диссертации

1 Разработана высокоуровневая поведенческая модель СВЧ-приемо-передатчика с прямым преобразованием частоты, позволяющая в сжатые сроки проводить верификацию параметрической и функциональной состоятельности, формировать требования к отдельным СВЧ-ФБ. Апробация модели проведена в ходе разработки СВЧ приемо-передающей ИМС считывателя систем радиочастотной идентификации с диапазоном рабочих частот 860...960 МГц.

2 Разработана библиотека СВЧ-элементов, включающая изолированные МОПТ с малыми вносимыми потерями, высокодобротные индуктивности, СПИ с диапазоном рабочих частот до 12 ГГц, не имеющие отечественных аналогов.

3 На основе разработанной научно-технической базы спроектированы и изготовлены по SiGe БиКМОП-технологии СВЧ-ФБ КС и АТ на их основе с повышенным уровнем верхней границы линейности амплитудной характеристики (более 17 дБм) и диапазоном рабочих частот до 3 ГГц и уровнем стойкости к дозовому воздействию не менее 1 Мрад, не имеющие отечественных аналогов.

4 Разработан аппаратно-программный комплекс автоматизированной экстракции параметров компактных схемотехнических моделей СВЧ-элементов, интегрированный с САПР Keysight (Agilent) IC-CAP.

5 На основе спроектированных СВЧ-элементов и ФБ разработана приемо-передающая ИМС с прямым преобразованием частоты с диапазоном рабочих частот до 3 ГГц, предназначенная для использования в составе считывателей систем радиочастотной идентификации, реализованная в виде «системы-в-корпусе» по LTCC-технологии и БИС по SiGe БиКМОП-технологии.

6 Результаты диссертации использованы при выполнении ряда научно-исследовательских (НИР) и опытно-конструкторских работ (ОКР) по заказу ОАО «НИИМА «Прогресс», ОАО «НПП «Пульсар», ОАО «НИИМЭ и Микрон», ОАО «НИИ ТП», АО «ЭНПО СПЭЛС».

Положения, выносимые на защиту:

1 Компактная модель изолированного МОПТ на основе ядра BSIM3v3, дополненная элементами для учета влияния подложки и карманов n- и p-типа, позволяющая проводить адекватный расчет СВЧ-параметров в диапазоне до 5 ГГц, в том числе значения вносимых потерь, адаптированная для использования в лицензионных САПР.

2 Методика проектирования СВЧ-ФБ КС на МОПТ, построенных по схеме «один-в-два», с повышенными значениями верхней границы линейности амплитудной характеристики (Рлин) при накладываемых ограничениях на величину вносимых потерь, изоляции между каналами. В основу методики положен подход, заключающийся в оптимизации топологических размеров и количества последовательно включенных МОПТ на основе зависимостей вносимых потерь, изоляции, потерь на отражения, Рлин, полученных в результате схемно-топологического моделирования с использованием предложенной модели изолированного МОПТ. Методика позволяет реализовать КС на МОПТ с Рлин более 17 дБм (при напряжении питания 2,5В) и значении вносимых потерь менее 1 дБ на частоте 3 ГГц.

3 Методика автоматизированного проектирования симметрирующих преобразователей импеданса в диапазоне рабочих частот по критерию наименьших вносимых потерь при накладываемых ограничениях на коэффициент трансформации и площадь, занимаемую на кристалле. Методика основана на оптимизации геометрических размеров индуктивностей первичной и вторичной обмоток, расстояния между ними исходя из частотных зависимостей вносимых потерь и предполагает использование результатов ЭМ-моделирования.

4 Результаты практического применения разработанных моделей и методик проектирования, эффективность которых подтверждена при создании набора СВЧ-ФБ КС, АТ с повышенными значениями верхней границы линейности амплитудной характеристики с диапазоном рабочих частот до 3 ГГц, СПИ с диапазоном рабочих частот до 12 ГГц, реализованных по кремний-германиевой БиКМОП-технологии.

Реализация и внедрение результатов работы

1 Результаты диссертации использованы при выполнении ряда НИР и ОКР по заказу ОАО «НИИМЭ и Микрон», ОАО «НИИМА «Прогресс», ОАО «НИИ ТП», АО «ЭНПО СПЭЛС» в части проведения системного моделирования, создания СВЧ-элементов и их моделей для САПР, схемно-топологического проектирования и моделирования СВЧ-ФБ приемо-передающих ИМС.

2 Результаты работы использованы в отчетных материалах более 10 НИР и ОКР, выполненных в интересах Минпромторга, Росатома, Роскосмоса.

Апробация результатов

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях «Электроника, микро- и нанoeлектроника» (2009-2012 гг.), «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА» проводимых ОАО «НПП «Пульсар» (2010-2014 гг.), «Научная сессия МИФИ» (2010-2014гг.), конференции молодых специалистов, проводимой ОАО «НПП «Исток» (2013 г.), 29-ой международной конференции по микроэлектронике (MIEL) в 2014г.

Личный вклад автора

В ходе диссертационной работы автором лично были разработаны:

- компактная нелинейная модель изолированного МОПТ;
- методика проектирования СВЧ-ФБ КС «один-в-два» на МОПТ с повышенными значениями верхней границы линейности амплитудной характеристики при накладываемых ограничениях на величину вносимых потерь, изоляции между каналами;
- методика автоматизированного проектирования топологий СПИ;
- все СВЧ-элементы и ФБ, рассматриваемые в данной работе (за исключением специально оговоренных случаев);
- поведенческая модель, архитектура и топология СВЧ приемопередающей ИМС считывателя для систем радиочастотной идентификации.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 32 работах (в период с 2009 г. по 2014 г.), в том числе в 3 изданиях из перечня ВАК России, в 2 изданиях, индексируемых Scopus. 5 работ опубликованы без соавторов. Издано учебное пособие.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и

приложения, содержит 165 страниц, 120 рисунков, 30 таблиц, список литературы из 100 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, рассмотрена степень проработанности темы, показана необходимость разработки библиотек активных и пассивных СВЧ-элементов, снабженных компактными моделями для САПР, СВЧ-ФБ, а также методик их проектирования. Определены цель и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, изложены положения, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации результатов.

В **первой главе** приводятся результаты проведенного литературного обзора по теме диссертационного исследования.

Проведенный анализ технологических библиотек элементов (PDK), поставляемых фабриками-изготовителями для зарубежных и отечественных SiGe БиКМОП-технологий показал, что в большинстве своем представлены в ограниченном количестве или вовсе отсутствуют следующие СВЧ-элементы: *масштабируемые* СВЧ-индуктивности, микрополосковые линии передачи (МПЛ), *изолированные* МОП-транзисторы (RF-МОПТ), являющиеся необходимым для построения широкого класса СВЧ-ФБ приемопередающих ИМС (например, КС, АТ, фазовращателей (ФВ), СПИ и др.).

Определен типовой маршрут проектирования СВЧ-ИМС, включающий следующие основные этапы:

- 1) предварительный этап: анализ требований технического задания (ТЗ), выбор технологии;
- 2) системное проектирование и верификация;
- 3) верификация / создание библиотеки элементов;
- 4) схемотехническое (и функциональное) проектирование;
- 5) проектирование топологии;
- 6) электромагнитное (ЭМ) моделирование топологии, учет влияния корпуса и проектирование измерительной оснастки;
- 7) проверка (верификация) топологии;
- 8) подготовка СВЧ-ИМС к производству;
- 9) экспериментальное исследование параметров СВЧ-ИМС.

Установлено, что последовательное выполнение этапов типового маршрута проектирования СВЧ-ИМС предусматривает

использование набора стандартных средств САПР, специализированных инструментов моделирования, средств экстракции, а также разработку новых недостающих аппаратно-программных средств, учитывающих специфику радиационно-ориентированного проектирования. Определены наиболее подходящие для реализации маршрута лицензионные САПР: Sentaurus TCAD – для задач приборно-технологического моделирования, Keysight IC-CAP – для экстракции параметров моделей элементов, Keysight Advanced Design System (ADS) и Cadence Virtuoso – для задач системного проектирования, схемно-топологического моделирования, верификации топологий и подготовки СВЧ-ИМС к производству.

Определены система параметров и функциональный состав современных СВЧ приемо-передающих ИМС, выполненных по SiGe БиКМОП-технологии. Приемо-передающие ИМС, предназначенные для использования в составе систем связи и радиочастотной идентификации (РЧИ), в зависимости от диапазона рабочих частот выполнены, как правило, по классической супергетеродинной или гомодинной архитектурам. Особым классом являются приемо-передающие модули активных фазированных антенных решеток, включающие следующие основные СВЧ-ФБ: КС, АТ, ФВ, усилители мощности и маломощные усилители.

Проведен анализ особенностей радиационного поведения SiGe БиКМОП приемо-передающих ИМС, согласно которому можно выделить следующие доминирующие радиационные эффекты, требующие рассмотрения:

- при воздействии потока нейтронов (структурные повреждения) – увеличение скорости рекомбинации носителей в базе ГБТ, связанное с эффектами смещения, приводящее к увеличению тока базы (I_b) и снижению статического коэффициента усиления (β);

- при дозовом воздействии – рост токов утечки в МОПТ, незначительное увеличение I_b в ГБТ;

- при импульсном воздействии ионизирующего излучения (ИИ) – линейный рост ионизационного тока в ГБТ, возможная активизация паразитной тиристорной структуры;

- при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) – аномально высокий ионизационный ток в ГБТ, связанный с высокой эффективностью собирания заряда из подложки, для КМОП фрагментов возможна активизация тиристорной структуры.

В заключении главы подводятся итоги проведенного обзора и формулируются основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена исследованию существующих и разработке новых моделей активных и пассивных СВЧ-элементов. Согласно результатам проведенного анализа установлено, что существующие модели по способу представления данных и типу используемых уравнений подразделяются на приборно-технологические (ПТМ), компактные и полунатурные.

Полунатурные модели, представляющие собой реальный компонент и средства связи с САПР, имеют весьма ограниченную область применения и в ходе данного исследования не рассматриваются.

Применение ПТМ, описывающих физические процессы в полупроводнике (ПП) и основанные на решении дифференциальных уравнений в частных производных, является целесообразным на этапе разработки библиотеки СВЧ-элементов и при проведении расчетной оценки уровня радиационной стойкости. В силу существенных временных затрат и повышенных требований к вычислительным ресурсам использование ПТМ на этапах схемно-топологического проектирования является нецелесообразным.

Установлено, что наиболее целесообразным для описания активных и пассивных СВЧ-элементов является использование компактных моделей, которые в свою очередь подразделяются на физические, формальные и табличные. Применение компактных физических моделей, в основу которых положены результаты анализа физических процессов в ПП, с упрощенной геометрией, упрощенным распределением легирующих примесей, в одномерном, квазидвумерном или квазитрехмерном приближениях, является оправданным для моделирования активных СВЧ-элементов.

Показано, что для описания пассивных СВЧ-элементов целесообразным является использование компактных формальных (схмотехнических) моделей, т.н. эквивалентных схем, построенных на основе формального сходства между поведением модели и моделируемого объекта относительно внешних выводов. На основе результатов проведенного анализа выявлены типовые компактные формальные модели, применяемые для моделирования пассивных СВЧ-элементов (резисторов, МИМ-конденсаторов, варикапов, микрополосковых линий передачи, спиральных индуктивностей,

контактных площадок) в САПР схемно-топологического проектирования.

На основании результатов проведенных исследований определены основные направления и пути совершенствования моделей СВЧ-элементов: рассмотрены особенности моделирования пассивных и активных элементов в СВЧ-диапазоне, а также общие подходы для учета радиационных эффектов на этапе схемно-топологического моделирования.

Показано, что для описания разработанного в данной работе RF-МОПТ следует использовать физическую модель на основе ядра BSIM3v3, включающую дополнительные элементы схемы «внешнего» транзистора, что позволяет проводить корректный анализ в СВЧ-диапазоне.

Общими подходами (методами) к проведению автоматизированной экстракции (определению) параметров моделей являются: аналитический расчет с использованием известных уравнений, описывающих физические процессы, метод прямой экстракции и оптимизационный метод. Согласно проведенным исследованиям установлено, что для оперативного создания моделей СВЧ-элементов целесообразно применение оптимизационного метода, заключающегося в определении значений набора параметров по наименьшему расхождению результатов моделирования и экспериментальных исследований. Реализация алгоритма экстракции параметров моделей на основе оптимизационного метода предполагает использование специализированных САПР экстракции (например, IC-CAP) и позволяет полностью формализовать и автоматизировать данную процедуру.

Разработана новая нелинейная компактная модель RF-МОПТ, построенная на основе ядра BSIM3v3 и дополнительных элементов «внешнего» транзистора, уточненная в части расчета величины вносимых потерь на проход, представленная на рисунке 1.

Описание дополнительных элементов «внешнего» транзистора RF-МОПТ приведено в таблице 1.

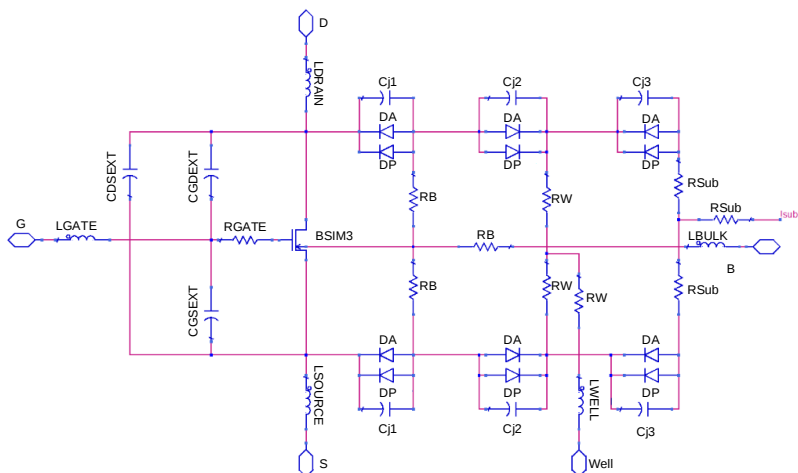


Рисунок 1 – Разработанная нелинейная компактная модель RF-МОПТ

Таблица 1 – Элементы «внешнего» транзистора модели RF-МОПТ

Элемент	Характеристика элементов (физ. смысл, эффект)
RGATE	Учет сопротивления поликремниевового затвора
Rsub	Учет объемного сопротивления подложки между областями стока и контактом к подложке
RB	Учет сопротивления кармана р-типа.
RW	Учет сопротивления кармана n-типа.
LBULK, LDRAIN, LGATE, LSOURCE, LWELL	Учет индуктивностей линий металлизации подложки, стока, затвора, истока, кармана.
CDSEXT, CGSEXT, CGDEXT	Учет паразитных емкостных связей между стоком и истоком, затвором и истоком, затвором и стоком.
Cj1, Cj2, Cj3	Учет емкостей переходов сток(исток)-карман р-типа, карман р-типа – карман n-типа, карман n-типа – подложка при расчетном моделировании на малом сигнале.
DA	Учет р-n-переходов сток (исток)-подложка
DP	Учет эффектов на границах переходов сток (исток)-подложка

Верификация модели RF-МОПТ проводилась в составе КС, построенного по схеме «один-в-два», на основании результатов схемно-топологического моделирования и экспериментальных исследований, подробно изложенных в четвертой главе.

В **третьей главе** рассмотрены методики проектирования СВЧ-ФБ КС и АТ на их основе с повышенным уровнем линейности амплитудной характеристики, СПИ на связанных индуктивностях, необходимых для построения приемо-передающих ИМС.

Согласно результатам сравнительного анализа конструктивно-технологических вариантов изготовления СВЧ-ФБ КС, изготавливаемых по SiGe БиКМОП-технологии, выявлена наиболее предпочтительная с точки зрения вносимых потерь (IL), изоляции (ISO), потребляемой мощности и площади, занимаемой на кристалле, схема построения КС на МОПТ, показанная на рисунке 2. Основным недостатком КС на МОПТ является малое значение линейности, ограниченное для современных субмикронных SiGe БиКМОП-технологий на уровне менее 10дБм.

Показано, что наиболее целесообразным методом повышения Рлин КС на МОПТ с точки зрения диапазона рабочих частот, величины вносимых потерь, потребления и площади, занимаемой на кристалле, является использование изолированных МОПТ, позволяющих «плавающее тело» за счет подключения высокоомных резисторов к р- и n-карманам.

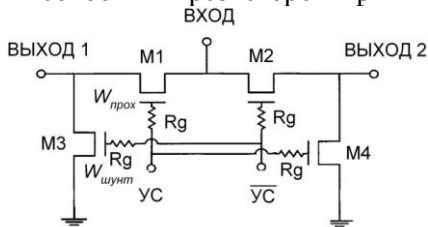


Рисунок 2 – Упрощенная схема КС на МОПТ

Проведен анализ причин нелинейных искажений и способов повышения линейности в КС на МОПТ. Установлено, что доминирующими факторами, ограничивающими Рлин КС на МОПТ являются: автосмещение переходов сток (исток)-подложка, отпирание и пробой МОПТ.

Разработанная методика проектирования КС на МОПТ, построенных по схеме «один-в-два», с повышенным значением Рлин при накладываемых ограничениях на величину IL, ISO, предполагает использование разработанных компактных моделей RF-МОПТ, интегрированных в САПР схемно-топологического моделирования, и

позволяет реализовать КС с динамическими характеристиками, близкими к предельным для SiGe БиКМОП-технологии.

Методика состоит из трех основных этапов. На первом этапе проводится предварительная оценка оптимальной ширины проходного транзистора $W_{\text{прох}}$, определяемой по минимуму IL на зависимости IL ($W_{\text{прох}}$) для фиксированной частоты, как показано на рисунке 3а. На втором этапе определяется величина $W_{\text{прох}}$ и устанавливается влияние $W_{\text{шунт}}$ на основные параметры КС. В данном случае параметром оптимизации является отношение $k = W_{\text{прох}}/W_{\text{шунт}}$. Выбор $W_{\text{прох}}$ и k проводится с помощью расчетных зависимостей IL , потерь на отражение (RL) и ISO от $W_{\text{прох}}$, показанных на рисунке 3б.

На третьем этапе определяют количество последовательно включенных МОПТ (n), необходимое для достижения требуемого значения $R_{\text{лин}}$ с использованием аналитического выражения (2) и на основании результатов схемно-топологического моделирования, как показано на рисунке 4:

$$n = \frac{\sqrt{0.25 \cdot (R_0 \cdot 0,001) \cdot 10 \left(\frac{P_{\text{лин}}}{10} \right)}}{U_{\text{пор}}}, \quad (1)$$

где R_0 – выходное сопротивление генератора, $U_{\text{пор}}$ – пороговое напряжение МОПТ.

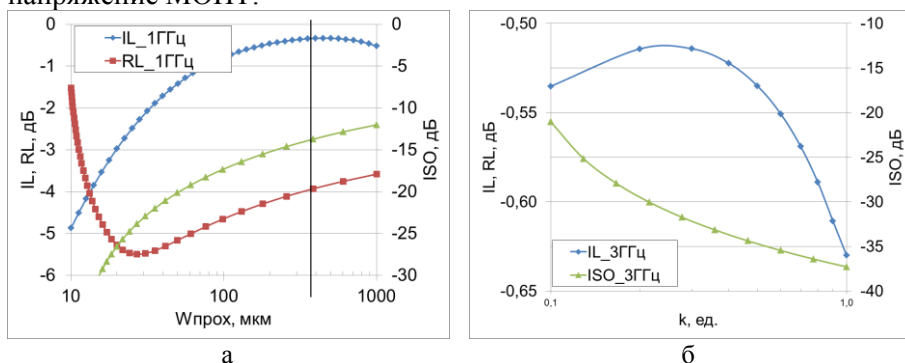


Рисунок 3 – Зависимость IL , ISO , RL от $W_{\text{прох}}$ (а), зависимость ISO и IL от $k = W_{\text{прох}}/W_{\text{шунт}}$ (б)

Методика прошла успешную апробацию в ходе проектирования КС с диапазоном рабочих частот до 3 ГГц по SiGe БиКМОП-технологии с проектной нормой 0,42/0,25 мкм, подробно

рассмотренного в четвертой главе. Разработанные КС на МОПТ были апробированы при проектировании пассивных ступенчатых АТ.

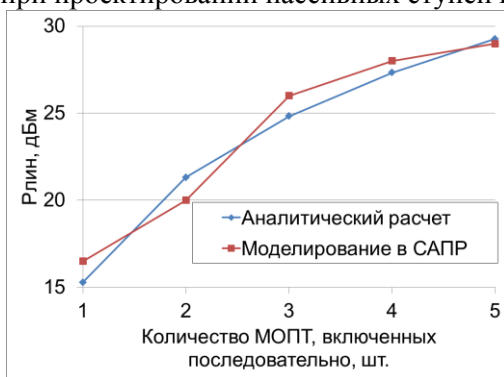


Рисунок 4 – Зависимость $R_{лин}$ от количества МОПТ, включенных последовательно, полученная с использованием аналитического выражения (2) и расчета в САПР с использованием разработанной модели RF-МОПТ-

На основе проведенного в работе сравнительного анализа были выделены СПИ на связанных индуктивностях, обладающие низкими $П$, а также относительно малыми габаритными размерами, упрощенная топология и эквивалентная модель показаны на рисунке 5.

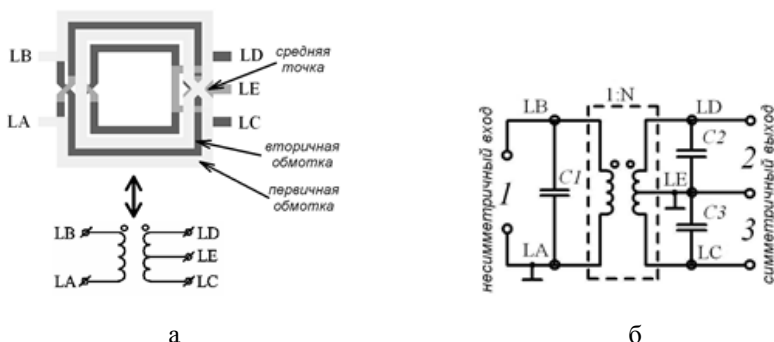


Рисунок 5 – Упрощенный вид структуры СПИ на связанных индуктивностях (а), эквивалентная схема для САПР (б)

Разработанная методика автоматизированного проектирования СПИ на связанных индуктивностях включает четыре основных этапа. На первом этапе производится расчет индуктивностей первичной и вторичной обмоток на основании аналитических выражений. Также

определяют значение шунтирующего вход SPI конденсатора (C1), необходимого для подстройки на требуемый диапазон частот. На втором этапе, на основании рассчитанных значений индуктивностей определяют геометрические размеры соответствующих им структур. На третьем этапе проводят ЭМ-анализ топологии SPI. Оптимизированные обмотки располагают друг под другом в выбранных слоях металлизации, таким образом, чтобы обеспечивался максимально возможный коэффициент связи. С использованием средств ЭМ-анализа проводят моделирование всей топологии SPI с целью оценки взаимного влияния обмоток. На четвертом этапе проектирования проводят дополнительную настройку SPI.

Результаты апробации методики на примере проектирования SPI с диапазоном рабочих частот 9...11 ГГц приведены в четвертой главе.

Разработана компактная модель SPI, предназначенная для интеграции в состав современных лицензионных САПР, обладающая упрощенной процедурой экстракции параметров, показанная на рисунке 6.

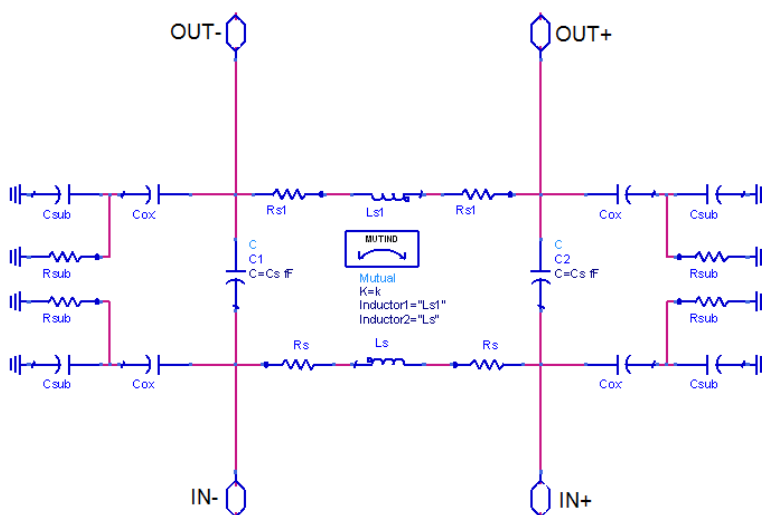


Рисунок 6 – Внешняя схема компактной модели SPI для САПР

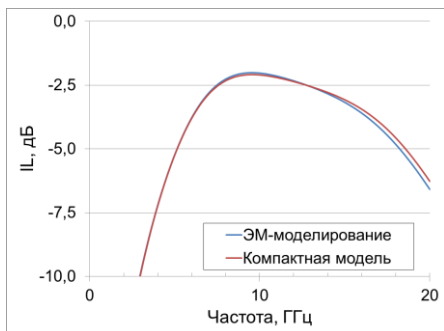


Рисунок 7 – Частотные зависимости IL СПИ, полученные в результате ЭМ-моделирования топологии и рассчитанные с использованием созданной компактной модели

При условии синтезированных по известным соотношениям моделей индуктивностей первичной и вторичной обмоток, процедура экстракции данной модели сводится к определению только двух параметров емкости C_s и величины k , определяющих емкостную связь и взаимную индуктивность. Представленная модель была верифицирована на основании результатов анализа ЭМ-анализа топологии СПИ, показанных на рисунке 7.

Четвертая глава обобщает результаты практической реализации SiGe БиКМОП СВЧ приемо-передающих ИМС. Глава состоит из четырех параграфов, посвященных вопросам системного проектирования и разработки поведенческой модели СВЧ интегрального приемо-передающего тракта (ИППТ) считывателя систем радиочастотной идентификации (РЧИ) стандарта ISO 18000-6, результатам разработки библиотеки СВЧ-элементов и ФБ, и их апробации на примере проектирования СВЧ приемо-передающей ИМС с диапазоном рабочих частот до 3 ГГц.

С использованием разработанного системного подхода, были определены требования к интегральным параметрам СВЧ-ИППТ, упрощенная структурная схема которого показана на рисунке 8.

В результате исследований, проведенных в настоящей работе, была создана библиотека СВЧ-элементов для SiGe БиКМОП-технологии с проектными нормами 0,42/0,24 мкм, включающая:

- СВЧ изолированные МОПТ (RF-МОПТ) с каналом n-типа, предназначенные для использования при проектировании КС с повышенной линейностью и малыми вносимыми потерями;

- набор высокочастотных СВЧ-индуктивностей, предназначенных для использования при проектировании СПИ, а также в качестве элементов согласования и фильтрации в составе усилительных, генераторных ФБ;

- набор микрополосковых линий передач (МПЛ).

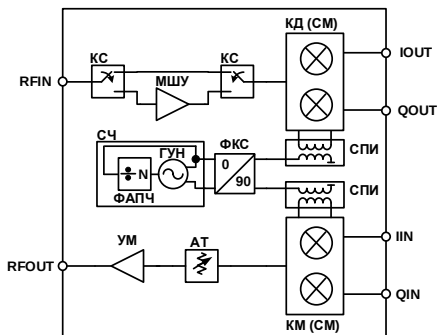


Рисунок 8 – Структурная схема СВЧ-ИППТ

Топологии разработанных RF-МОПТ показаны на рисунке 9, параметры приведены в таблице 2.



Рисунок 9 – Топологии разработанных RF-МОПТ с шириной канала 300 мкм (а) и 100 мкм (б)

Таблица 2 – Параметры RF-МОПТ

$W_{\text{ПРОХ, мкм}}$	300	$W_{\text{ШУНТ, мкм}}$	100
$L, \text{ мкм}$	0,25	$L, \text{ мкм}$	0,25
$Ng, \text{ ед.}$	20	$Ng, \text{ ед.}$	10

Разработанные СВЧ-индуктивности предназначены для использования в качестве первичной и вторичной

обмоток СПИ, топологии которых приведены на рисунке 10, значения основных параметров в таблице 3.

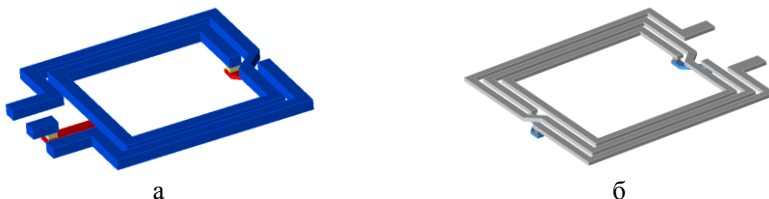
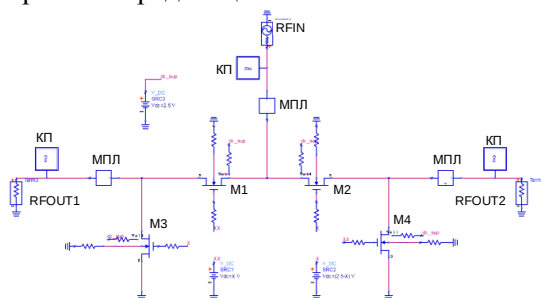


Рисунок 10 – ЭМ-модели СВЧ-индуктивностей номиналом 0,74 нГн (а) и 1,5 нГн (б), являющихся первичной и вторичной обмотками СПИ

Таблица 3 – Параметры разработанных СВЧ-индуктивностей

Индуктивность L, нГн	0,74	Индуктивность L, нГн	1,5
Ширина МПЛ, W, мкм	7	Ширина МПЛ, мкм	4
Расстояние между соседними МПЛ, S, мкм	4	Расстояние между соседними МПЛ, ед.	3
Внутренний размер, Di, мкм ²	80×80	Внутренний размер, Ai, мкм	80×80
Внешний размер, Do, мкм ²	116×116	Внешний размер, Ao, мкм	116×116
Добротность, Q, ед.	16 @20ГГц	Добротность, Q, ед.	5@20ГГц
Частота саморезонанса, Fsr, ГГц	48	Частота саморезонанса, Fsr, ГГц	23

С целью апробации разработанных методик автоматизированного проектирования, рассмотренных в третьей главе, были спроектированы и изготовлены по SiGe БиКМОП-технологии СВЧ-ФБ КС на RF-МОПТ, построенные по схеме «один-в-два», ступенчатый АТ на их основе и набор СПИ на связанных индуктивностях, предназначенные для использования в составе СВЧ прямо-передающих ИМС.



Значения параметров разработанного ступенчатого АТ, выполненного на основе КС на RF-МОПТ, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры разработанного ступенчатого АТ на частоте 1 ГГц

Параметр	Значение		
	Системный анализ	Моделирование	Эксперимент
ΔF , ГГц	0...3	0...3	0...3
IL , дБ	≤ 4	0,6	0,6
Диапазон регулировки ослабления, АТР, дБ	21	20,7	22,0
Дискрет регулировки ослабления, ΔAT , дБ	7	6,9	7,1
RL , дБ	–	-12	-12
$R_{лин}$, дБм	≥ 17	17,2	17,5

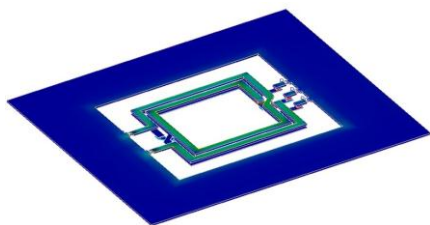


Рисунок 12 – ЭМ-модель разработанного СПИ с коэффициентом трансформации 1:1

ЭМ-модель СПИ на связанных индуктивностях с коэффициентом трансформации 1:1 и диапазоном рабочих частот от 9 до 11 ГГц показана на рисунке 12, основные значения параметров приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Параметры разработанного СПИ на частоте 10 ГГц

Наименование параметра, единица измерения	Значение	
	Моделирование	Эксперимент
IL , дБ	2,5	2,3
RL , дБ	-30	-29
Амплитудный разбаланс выходов, АЕ, дБ	1,1	1,1
Фазовый разбаланс выходов, РЕ, дБ	1,6	1,6

На рисунке 13 представлен внешний вид топологии разработанного СВЧ-ИППТ считывателя, выполненного с использованием разработанных СВЧ-элементов и ФБ и изготовленного по SiGe БиКМОП-технологии 0,42/0,24мкм. Значения основных параметров СВЧ-ИППТ, полученные в результате схемно-

топологического моделирования и экспериментальных исследований, приведены в таблице 7.

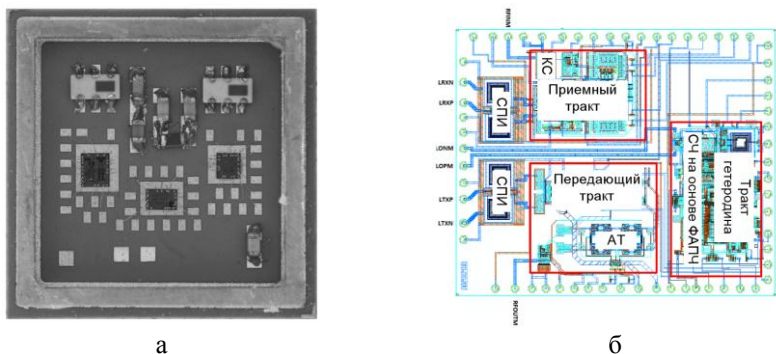


Рисунок 13 – Реализация СВЧ-ИППТ: в составе LTСС-корпуса (а), монолитное исполнение (б)

Таблица 7 – Параметры разработанного СВЧ-ИППТ

Параметр	Системный анализ	Эксперимент
ΔF , МГц	860...960	860...960
$P_{лин}$, дБм	не менее 0 (Talk) не менее -13,3 (LBT)	+8 -23
Коэффициент шума приемника, дБ	не более 28 (Talk) не более 9 (LBT)	27 9
Уровень фазового шума гетеродина, дБн/Гц @100кГц	не более -95	-95

Закключение обобщает основные результаты работы, которые сводятся к следующему:

1 Разработана новая компактная модель изолированного МОПТ на основе ядра BSIM3v3, дополненная элементами для учета влияния полупроводящей подложки и карманов n- и р-типа и позволяющая проводить адекватный расчет СВЧ-параметров в диапазоне до 5 ГГц, в том числе значения вносимых потерь, предназначенная для использования лицензионных САПР.

2 Создана компактная модель симметрирующего преобразователя импедансов, учитывающая емкостную и индуктивную составляющие ЭМ-связи между обмотками, позволяющая проводить адекватный расчет малосигнальных параметров, в том числе вносимых потерь, потерь на отражение в

диапазоне до 20 ГГц, отличающаяся упрощенной процедурой экстракции параметров и адаптированная для использования в современных лицензионных САПР.

3 Предложена проектирования СВЧ-ФБ КС на МОПТ, построенных по схеме «один-в-два», с повышенными значениями верхней границей линейности амплитудной характеристики (Рлин) при накладываемых ограничениях на величину вносимых потерь, изоляции между каналами. В основу методики положен подход, заключающийся в оптимизации топологических размеров и количества последовательно включенных МОПТ на основе зависимостей вносимых потерь, изоляции, потерь на отражения, Рлин, полученных в результате схемно-топологического моделирования с использованием предложенной модели изолированного МОПТ. Методика позволяет реализовать КС на МОПТ с Рлин более 17 дБм (при напряжении питания 2,5В) и значении вносимых потерь менее 1 дБ на частоте 3 ГГц.

4 Разработана новая методика автоматизированного проектирования симметрирующих преобразователей импеданса в диапазоне рабочих частот по критерию наименьших вносимых потерь при накладываемых ограничениях на коэффициент трансформации и площадь, занимаемую на кристалле. Методика основана на оптимизации геометрических размеров индуктивностей первичной и вторичной обмоток, расстояния между ними исходя из частотных зависимостей вносимых потерь, полученных в результате ЭМ-моделирования.

5 Создана библиотека СВЧ-элементов, включающая изолированные МОПТ с малыми вносимыми потерями на проход, высокочастотные индуктивности, не имеющие отечественных аналогов.

6 На основе разработанной научно-технической базы спроектированы и изготовлены по SiGe БиКМОП-технологии СВЧ-ФБ КС и АТ на их основе с Рлин более 17 дБм и диапазоном рабочих частот до 3 ГГц, СПИ с диапазоном рабочих частот до 12 ГГц с уровнем стойкости к дозовому воздействию не менее 1 Мрад, не имеющие отечественных аналогов.

7 Создан программный комплекс автоматизированной экстракции параметров компактных схемотехнических моделей СВЧ-элементов, интегрированный в САПР Keysight (Agilent) IC-CAP.

8 На основе разработанных СВЧ-элементов и ФБ создана приемно-передающая ИМС с прямым преобразованием частоты с диапазоном рабочих частот до 3ГГц, предназначенная для использования в составе считывателей систем радиочастотной идентификации, реализованная в виде «системы-в-корпусе» по LTCC-технологии и БИС по SiGe БиКМОП-технологии.

В приложении обобщены типовые примеры компактных формальных моделей СВЧ-элементов и выражения для оценки значений их параметров.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

1. Елесин В.В., Назарова Г.Н., Усачев Н.А. Проектирование пассивных элементов для монолитных кремний-германиевых СВЧ ИС, устойчивых к воздействию радиации. Микроэлектроника. –2010. –Т.39. –№2. –С.149-157.

2. Елесин В.В., Назарова Г.Н., Усачев Н.А. и др. Построение монолитных ИС многоразрядных фазовращателей СВЧ-диапазона с улучшенными точностными характеристиками // Известия высших учебных заведений. Электроника. Вып. 5 (97). 2012, С.31-38.

3. Usachev N. A., Elesin V.V., Nikiforov A.Y., Telets V. A. Behavioral approach to design universal UHF RFID reader transceiver ICs / Proceedings of the International Conference on Microelectronics, ICM. –2014. –PP. 405-408.

4. Системный подход к проектированию интегральных приемопередатчиков считывателей для систем РЧИ УВЧ диапазона / Усачев Н.А., Елесин В.В., Назарова Г.Н., Чуков Г.В., Телец В.А., Амбуркин К.М., Сотсков Д.И., Дмитриев В.А., Шелепин Н.А. // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - 2014. Сборник трудов под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, -2014. Часть III. С. 81-84.

5. Проектирование пассивных элементов для монолитных кремниевых СВЧ ИС / Елесин В.В., Назарова Г.Н. , Усачев Н.А. и др. // 11-я Российская научно-техническая конференция: Электроника, микро- и нанoeлектроника 2009. Сб. науч. трудов / Под ред. В.Я. Стенина. –М.: МИФИ, 2009. –С.45-56.

6. Усачев Н.А. Причины нелинейных искажений в кремниевых транзисторных переключателях СВЧ диапазона // 13-я Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых "Молодежь и наука". Тез. докладов. –М.: НИЯУ МИФИ, 2010. –С.89-90.

7. Разработка базовых блоков приемного модуля локатора СВЧ диапазона с использованием схмотехнических и поведенческих моделей / Елесин В.В., Назарова Г.Н., Усачев Н.А. и др. // Научная сессия МИФИ-2009. Сб. аннот. М.: МИФИ, 2009. –С. 180.

8. Елесин В.В., Усачев Н.А., Громов Д.В. Особенности проектирования монолитных ступенчатых аттенуаторов СВЧ диапазона // Научная сессия МИФИ-2010. Сб. аннот. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. –С.40.

9. Елесин В.В., Назарова Г.Н., Усачев Н.А. Способы увеличения линейности кремниевых SPDT-переключателей СВЧ диапазона // Электроника, микро- и наноэлектроника 2010. Сб. науч. трудов –М.: НИЯУ МИФИ, 2010. –С.151-154.

10. Усачев Н.А., Елесин В.В. Проектирование симметрирующих трансформаторов СВЧ диапазона // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2011. Молодежь и наука. Тезисы докладов в 3-х частях. Ч. 1. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. –С.70-72.

11. Елесин В. В., Усачев Н. А., Дмитриев В. А. Сравнительный анализ схем построения интегральных приемопередающих модулей для систем РЧИ стандарта 18000-6С // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. науч. тр.: НИЯУ МИФИ, 2012. С.102-109.

12. Елесин В.В., Усачёв Н.А., Дмитриев В.А. Базовые составные функциональные блоки аналого-цифровой БИС приемопередатчика считывателя для систем радиочастотной идентификации УВЧ диапазона // Материалы научно-технической конференции -М: ФГУП "НПП "Пульсар", 2012. С.78-81.

Учебно-методические работы

1. В.В. Елесин, Н.А. Усачев, Г.В. Чуков. Лабораторный практикум по курсу «Радио- и СВЧ-электроника»: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, -2014. -104с.