

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

УДК 621.382

Новиков
Павел Эдуардович

Микроволновые монолитные интегральные схемы

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание степени магистра
по специальности 7-06-0713-01 «Микро- и наноэлектроника»

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Стемпницкий В.Р.

Минск 2025

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

Стемпицкий Виктор Романвич,
кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

Власова Галина Александровна,
кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий и технологии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «20» июня 2025 г. в 9⁰⁰ часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 114, тел.: 293-89-26, e-mail: kafme@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия применение спутников, работающих в *K/Ka*-диапазоне (от 18 до 40 ГГц) значительно возросло в связи с большим спросом на системы связи. В дополнение к этому, повышенный спрос на спутниковую связь с большим количеством каналов приводит к появлению массивных систем с большой полезной нагрузкой, в которых важную роль играют малошумящие усилители.

Уникальные свойства полупроводниковых соединений A_3B_5 (широкая запрещенная зона, высокая теплопроводность, высокое напряжение пробоя, высокая подвижность электронов) и устройств на их основе (транзисторов с высокой подвижностью электронов, гетеропереходных биполярных транзисторов) делают их хорошим выбором для использования в качестве усилителя мощности в СВЧ- и силовой электронике. Таким устройства применяются как в дискретном исполнении, так и в виде монолитной интегральной микросхемы. Надежность устройств при реализации в виде ИМС выше, чем на дискретных компонентах.

Аналоговые монолитные интегральные микросхемы, работающие в СВЧ-диапазоне (микроволновые монолитные интегральные схемы, ММИС) на основе полупроводниковых соединений A_3B_5 появились в 70-е годы XX века. В первых ММИС активные элементы реализовывались в легированных слоях, а пассивные элементы были представлены микрополосковыми линиями, спиральными – индуктивностями и МДМ-конденсаторами, сформированными на поверхности полуизолирующей подложки. Применение современных методов (например, копланарных линий передач) позволило увеличить рабочий диапазон свыше 30 ГГц.

Особенность применения ММИС на основе полупроводниковых соединений A_3B_5 требует учета влияния на структуры комплексного воздействия электромагнитных полей, которые вызывают нагрев активных областей, и, как следствие, ухудшение (деградацию) эксплуатационных характеристик, вплоть до расплавления активных областей приборных структур при достижении температуры вжигания при высоких мощностях.

В связи с этим, приоритетными направлениями в области проектирования ММИС являются повышение устойчивости и помехозащищенности, а актуальность обусловлена необходимостью создания эффективных методов проектирования микроволновых монолитных интегральных микросхем с улучшенными эксплуатационными характеристиками, предназначенных для применения в электронной

аппаратуре связи, размещаемой на космических объектах и системах оборонного сектора.

Объектом исследования являются микроволновые монолитные интегральные схемы (ММИС). Предметом исследования являются физические процессы, происходящие в приборных структурах ММИС при воздействии электромагнитных помех (ЭМП).

Целью работы является разработка и апробация комплексного подхода к проектированию микроволновых (K/Ka -диапазон) ММИС на основе полупроводниковых соединений A_3B_5 с учетом изменения (деградации) их эксплуатационных характеристик при влиянии ЭМП.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- посредством компьютерного моделирования провести настройку методов и моделей, описывающие физические процессы, протекающие в приборных структурах транзисторов с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) и гетеропереходных биполярных транзисторах (ГБТ) на основе полупроводниковых соединений A_3B_5 ;

- выполнить компьютерное моделирование эксплуатационных характеристик приборных структур ТВПЭ и ГБТ на основе полупроводниковых соединений A_3B_5 , функционирующих в нормальных условиях и при воздействии ЭМП, а также определить конструктивно-технологические параметры, обеспечивающие улучшение эксплуатационных характеристик;

- разработать и реализовать на языке описания аппаратуры *Verilog-A* компактные модели приборных структур ТВПЭ и ГБТ на основе полупроводниковых соединений A_3B_5 , учитывающие изменение (деградацию) эксплуатационных характеристик в результате воздействия ЭМП;

- разработать стратегию (методику) экстракции и идентификации параметров компактных моделей приборных структур ТВПЭ и ГБТ на основе полупроводниковых соединений A_3B_5 , учитывающие изменение (деградацию) эксплуатационных характеристик в результате воздействия ЭМП;

- разработать схемотехническое и топологическое решения малошумящего усилителя, приемника и передатчика систем связи, функционирующие в микроволновом (K/Ka -диапазоне) и стойких к воздействию ЭМП.

Диссертационная работа выполнена самостоятельно, проверена в системе «Антиплагиат». Общий объем диссертации составляет 100 страниц.

Общая характеристика работы

Актуальность темы магистерской диссертации. Актуальность работы обусловлена необходимостью создания эффективных методов проектирования микроволновых монолитных интегральных микросхем с улучшенными эксплуатационными характеристиками (повышенной стойкостью к ЭМП), предназначенных для применения в электронной аппаратуре связи, размещаемой на космических объектах и системах оборонного сектора.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка и апробация комплексного подхода к проектированию микроволновых (K/Ka -диапазон) монолитных интегральных схем (ММИС) на основе полупроводниковых соединений A_3B_5 с учетом изменения (деградации) их эксплуатационных характеристик при функционировании в условиях влияния электромагнитных помех (ЭМП).

Для достижения поставленной цели НИР планируется решить следующие задачи:

- посредством компьютерного моделирования провести настройку методов и моделей, описывающие физические процессы, протекающие в приборных структурах транзисторов с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) и гетеропереходных биполярных транзисторах (ГБТ) на основе полупроводниковых соединений A_3B_5 ;

- выполнить компьютерное моделирование эксплуатационных характеристик приборных структур ТВПЭ и ГБТ на основе полупроводниковых соединений A_3B_5 , функционирующих в нормальных условиях и при воздействии ЭМП, а также определить конструктивно-технологические параметры, обеспечивающие улучшение эксплуатационных характеристик;

- разработать и реализовать на языке описания аппаратуры *Verilog-A* компактные модели приборных структур ТВПЭ и ГБТ на основе полупроводниковых соединений A_3B_5 , учитывающие изменение (деградацию) эксплуатационных характеристик в результате воздействия ЭМП;

- разработать стратегию (методику) экстракции и идентификации параметров компактных моделей приборных структур ТВПЭ и ГБТ на основе полупроводниковых соединений A_3B_5 , учитывающие изменение (деградацию) эксплуатационных характеристик в результате воздействия ЭМП;

- разработать схемотехническое и топологическое решения малошумящего усилителя, приемника и передатчика систем связи, функционирующие в микрометровом (K/Ka -диапазоне) и стойких к воздействию ЭМП.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются микроволновые монолитные интегральные схемы, предметом – физические, процессы, протекающие в приборных структурах транзисторов с высокой

подвижностью электронов и гетеропереходных биполярных транзисторов на основе соединений A_3B_5 , а также методы моделирования, проектирования и оптимизации их эксплуатационных характеристик в условиях воздействия электромагнитных помех

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

Комплексный подход, включающий в себя этапы приборного и схемотехнического моделирования, а также топологического проектирования с учетом влияния воздействия электромагнитных помех на активные элементы, обеспечивает проектирование стойких к воздействию помех (деградация менее 10 %) усилительных устройств микроволновых монолитных интегральных схем на основе соединений элементов A_3B_5 , обладающих параметрами $S_{21} > 20$ дБ, $Mu > 1$, $NF < 3$ дБ, а также пассивных фильтрующих устройств, обладающих $S_{21} < 3$ дБ, в частотном K/Ka -диапазоне (от 18 до 40 ГГц).

Личный вклад соискателя. В настоящую диссертационную работу вошли результаты как личных исследований автора, так и его совместной деятельности с научным руководителем Стемпицким В. Р.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях: Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : 27-я Всероссийская молодежная научная конференция, Ульяновск, октябрь 2024 г.; Компьютерное проектирование в электронике : Международная научно-практическая конференция, Минск, ноябрь 2024 г.; Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2024) : XI Международная заочная научно-техническая конференции, Тольятти, ноябрь 2024 г.; II международная научно-техническая конференция «ОПТО-, МИКРО И СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА – 2022», Минск, сентябрь 2022 г.; Молодежь в науке – 2024 : XXI Международная научная конференция молодых ученых, Минск, октябрь 2024 г.

Публикации результатов диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в сборниках материалов и тезисов докладов названных конференций; 2-м томе журнала «International scientific journal «Science and Innovation»; 58-м томе журнала «Научно-технический журнал «Проблемы физики, математики и техники».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа выполнена самостоятельно, проверена в системе «Антиплагиат». Цитирования обозначены ссылками на публикации, указанными в «Списке использованных источников». Отчет приведен в приложении А. Общий объем диссертации составляет 100 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы проектирования устройств на основе микроволновых монолитных интегральных схем (ММИС), определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их публикации, а также, структура и объем диссертации.

В **первой главе** приведен анализ научно-исследовательской литературы по теме диссертационной работы. Рассматриваются принципы работы и основные метрики качества ММИС. По итогу главы делаются выводы о выборе способов построения схемотехнических решений.

Во **второй главе** описаны программные комплексы компаний *Silvaco* и *Keysight*, используемые для моделирования в микроэлектронике.

В **третьей главе** представлен процесс разработки компактных моделей для транзисторов с высокой подвижностью электронов и гетеропереходных биполярных транзисторов. Описываются методики идентификации параметров моделей с использованием программного комплекса *Silvaco Utmost4*.

В **четвертой главе** описывается методика проектирования ММИС, включающая приборное, схемотехническое и топологическое моделирование. Представлены результаты разработки схемотехнических решений малошумящего усилителя, приемника и передатчика систем связи, работающих в K/Ka -диапазоне. Рассмотрены вопросы разработки топологических решений, учета воздействия электромагнитных помех и собственных шумов активных элементов.

В **заключении** представлена оценка полученных результатов.

В **приложениях** приведены проверка на антиплагиат, параметры разработанных моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы проведен анализ усилительных структур микроволновых монолитных интегральных схем на основе активных элементов, выполненных из широкозонных материалов, определены их ключевые характеристики и возможности применения.

В результате выполнения работы проведен анализ существующих компактных моделей транзисторов с высокой подвижностью электронов. Обоснован выбор в качестве базовой модели *ASM-HEMT*, для которой реализована базовая стратегия экстракция параметров модели. В соответствии с ней посредством использования модуля *Utmost4* программного комплекса *Silvaco* определены параметры модели *ASM-HEMT*. Максимальная относительная погрешность схемотехнического моделирования с использованием экстрагированного набора параметров в сравнении с экспериментальными данными составила не более 42,26 % (в области низких токов).

Выполнен анализ существующих компактных моделей ГБТ. Обоснован выбор в качестве базовой модели *MEXTRAM*, для которой реализована базовая стратегия экстракция параметров модели. В соответствии с ней посредством использования модуля *Utmost4* программного комплекса *Silvaco* определены параметры модели *MEXTRAM level 504*. Максимальная относительная погрешность в сравнении с экспериментальными данными составила не более 10 %.

В соответствии с разработанными методиками в модуле *Utmost4* программного комплекса компании *Silvaco* определены параметры компактных (электрических) моделей *ASM-HEMT* и *MEXTRAM level 504*. Вольт-амперные характеристики, используемые в процессе экстракции, получены в результате проведения компьютерного моделирования. Максимальная относительная погрешность схемотехнического моделирования, выполненного в программном комплексе *ADS Keysight*, с использованием экстрагированного набора параметров модели с учетом источника шума, реализованного на языке описания аппаратуры *Verilog-A*, в сравнении с результатами приборного моделирования не превышает 10 %.

Рассмотрены основные схемотехнические решения малошумящих усилителей (МШУ), приемника и передатчика систем связи, функционирующих в микрометровом (K/Ka) диапазоне длин волн. Показана методика определения параметров схемы, обеспечивающих наилучшие эксплуатационные параметры (минимальный коэффициент шума системы, максимальный коэффициент усиления, коэффициент стабильности MU).

Показано, что при величине индуктивности $L = 13$ нГн и сопротивления $R = 200$ Ом в цепи затвора обеспечивается безусловная стабильность схемы (коэффициент стабильности равен 1,001), а коэффициент усиления равен 26,1 дБ. Исследованы зависимости напряжения на коллекторе, соответствующего минимальному коэффициенту шума и максимальному коэффициенту усиления, от напряжения на затворе.

Разработаны топологические решения малошумящего усилителя, антиэлайзингового, восстанавливающего, а также полосового фильтров, функционирующих в K/Ka -диапазоне длин волн. Выполнена оптимизация топологического решения, позволившая добиться значений усиления по мощности S_{21} порядка 3 дБ, а коэффициента шума NF – порядка 2,1 дБ в рабочем диапазоне частот. Предложено решение по использованию автоматического регулирования частоты и усиления.

В результате оптимизационных расчетов с использованием модифицированного алгоритма Маркара-Левенберга получены значения конструктивно-технологических параметров, обеспечивающих уменьшение максимальной величины диффузионного шума, шума рекомбинации-генерации и фликкер-шума на порте 1 на 69,3 %, 96,1 % и 95,8 % от номинального значения соответственно. Для порта 2 это значение увеличилось на 4,1 % для диффузионного шума и уменьшилось на 95,5 % и 6,3 % для шума рекомбинации-генерации и фликкер-шума соответственно.

Результаты, полученные в рамках выполнения магистерской диссертации, использованы при выполнении НИР «Разработка методов проектирования и оптимизации микроволновых монолитных интегральных схем на основе полупроводниковых соединений A_3B_5 с учетом влияния электромагнитных помех» (договор с БРФФИ № T23МЭ-042 от 02.05.2023 г.). Полученные результаты НИР внедрены в учебный процесс учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в 2024/2025 учебном году на кафедре микро- и нанoeлектроники в качестве материалов лекционного курса и лабораторных занятий по дисциплине «Программные средства проектирования интегральных микросхем» для студентов специальностей 1-41 01 02 «Микро- и нанoeлектронные технологии и системы» и 1 – 41 01 03 «Квантовые информационные системы».

Объект внедрения представляет собой разработанные методики моделирования эксплуатационных характеристик транзисторных приборных структур на основе соединений A_3B_5 , а также методики разработки их компактных моделей; методики схемотехнического и топологического проектирования микроволновых монолитных интегральных схем на основе

полупроводниковых соединений A_3B_5 , а также их оптимизации с учетом влияния электромагнитных помех.

Учебно-воспитательный эффект работы заключается в повышении уровня знаний студентов о настройке систем автоматизированного проектирования в микроэлектронике, а также получении навыков схемотехнического моделирования и топологического проектирования микроволновых монолитных интегральных схем, а также других изделий сверхвысокочастотной электроники. Внедренная методика может использоваться при выполнении курсовых и дипломных работ, а также при проведении научных исследований.

В качестве потенциальных потребителей созданной научно-технической продукции могут выступать научно-исследовательские институты (научные центры НАН Беларуси) и предприятия электронной и приборостроительной промышленности Республики Беларусь, а также отечественные и зарубежные компании, работающие в области создания элементной базы монолитных интегральных микросхем, а также микроэлектронных изделий, функционирующих в K/Ka диапазонах длин волн.

В качестве направления дальнейших исследований по теме НИР предлагается повысить точность моделирования разрабатываемых схем посредством усовершенствования методики определения параметров компактных моделей *ASM-HEMT* и *MEXTRAM*. В первую очередь это может быть достигнуто посредством разработки и внедрения экспериментальной установки для оценки влияния ЭМП на эксплуатационные характеристики как отдельных элементов ММИС, так и схем в целом. Это обеспечит возможность выполнять сравнение результатов схемотехнического моделирования с экспериментальными данными и своевременно вносить правки в разработанные компактные (электрические) модели. Кроме того, позволит разработать более сложные и реалистичные модели шума активных компонентов, отражающих влияние электромагнитных помех.

Также одним из направлений может являться работа, посвященная разработке новых компактных моделей, учитывающих особенности новых материалов и технологий ММИС, например, применение нитрида галлия и других современных полупроводниковых материалов.

Реализация этих направлений исследования могут значительно повысить точность оценки влияния ЭМП на эксплуатационные характеристики ММИС, функционирующих в K/Ka диапазонах длин волн, а также существенно снизить затраты на проектирование таких изделий.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

[А.1] Разработка методов определения параметров физико-топологической модели арсенид-галлиевого транзистора с высокой подвижностью электронов / П. Э. Новиков, И. Ю. Ловшенко, П. С. Кратович [и др.] // International scientific journal «Science and Innovation». – 2023. – Vol. 2, № 3. – Р. 935–939.

[А.2] Интегральная схема считывания данных с неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа / П. Э. Новиков, Чан Ван Чиеу, Ха Дао Динь [и др.] // Научно-технический журнал «Проблемы физики, математики и техники» – 2024. – Т. 58, № 1. – С. 79–85.

[А.3] Новиков, П. Э. Дополнение компактных (электрических) моделей приборных структур транзисторов с высокой подвижностью электронов и гетеропереходных биполярных транзисторов на основе полупроводниковых соединений АЗВ5, учитывающее изменение (деградацию) эксплуатационных характеристик в результате воздействия ЭМП / П. Э. Новиков, П. С. Кратович, И. Ю. Ловшенко // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 27-й Всероссийской молодежной научной конференции, Ульяновск, октябрь 2024 г. / Ульяновский государственный технический университет. – Ульяновск, 2024. – С. 237–239.

[А.4] Новиков, П. Э. Дополнение к компактным моделям арсенидгаллиевых приборных структур, учитывающее изменение (деградацию) эксплуатационных характеристик при радиационном воздействии / П. Э. Новиков, И. Ю. Ловшенко, К. В. Корсак // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 27-й Всероссийской молодежной научной конференции, Ульяновск, октябрь 2024 г. / Ульяновский государственный технический университет. – Ульяновск, 2024. – С. 237–239.

[А.5] Новиков, П. Э. Верификация методики определения параметров компактной модели GaAs гетеропереходных биполярных транзисторов / П. Э. Новиков, П. С. Кратович, К. В. Корсак, И. Ю. Ловшенко // Компьютерное проектирование в электронике : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Минск, ноябрь 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2024. – С. 189–191.

[А.6] Новиков, П. Э. Схемотехническое решение интегральной схемы считывания данных с неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа / П. Э. Новиков, К. В. Корсак, И. Ю. Ловшенко // Информационные

технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2024) : материалы XI Международной заочной научно-технической конференции, Тольятти, ноябрь 2024 г. / Поволжский государственный университет. – Тольятти, 2025. – С. 432–436.

[А.7] Новиков, П. Э. Оптимизация режима работы транзистора с высокой подвижностью электронов на основе GaAs, работающего в К/Ка-диапазоне / П. Э. Новиков, К. В. Корсак, И. Ю. Ловшенко // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2024) : материалы XI Международной заочной научно-технической конференции, Тольятти, ноябрь 2024 г. / Поволжский государственный университет. – Тольятти, 2025. – С. 437–444.

[А.8] Новиков, П. Э. Учет воздействия электромагнитных помех на приборные структуры транзистора с высокой подвижностью электронов на основе широкозонных полупроводников / П. Э. Новиков, П. С. Кратович, И. Ю. Ловшенко // Молодежь в науке – 2024 : тезисы докладов XXI Международной научной конференции молодых ученых, Минск, октябрь 2024 г. – Минск, 2024. – С. 362–365.