

На правах рукописи



Лукашин Владимир Михайлович

**Гетероструктурные СВЧ полевые транзисторы
с селективным донорно - акцепторным
легированием**

**Специальность 2.2.2 «Электронная компонентная база микро- и
наноэлектроники, квантовых устройств»**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

г. Фрязино 2023 г.

Работа выполнена в АКЦИОНЕРНОМ ОБЩЕСТВЕ
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «ИСТОК»
ИМЕНИ А.И. ШОКИНА»

Официальные оппоненты:

Егоров Антон Юрьевич член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, технический директор ООО «Коннектор Оптикс», г. Санкт-Петербург.

Афанасьев Михаил Сергеевич доктор технических наук, главный научный сотрудник РТУ МИРЭА, г. Москва.

Обухов Илья Андреевич доктор физико-математических наук, генеральный директор ОАО «Синергетика», г. Москва.

Научный консультант: Пашковский Андрей Борисович, доктор физико-математических наук, заместитель начальника отделения АО «НПП «Исток» им. Шокина» по научной работе.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ) г. Москва.

Защита состоится 8.06.2023 в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 74.1.008.01 при АО «НПП «Исток» по адресу: 141190, Московская область, г. Фрязино, Вокзальная, д. 2а. Большой конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «НПП «Исток» им. Шокина» и на сайте <http://science.istokmw.ru/avtoreferati-dissertaci/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, отправлять по адресу: 141190, Московская обл., г. Фрязино, Вокзальная ул., д. 2а, на имя ученого секретаря Куликовой Ирины Владимировны (dissovet@istokmw.ru).

Автореферат разослан 16 марта 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Куликова И.В.

Актуальность работы.

Твердотельная сверхвысокочастотная (СВЧ) электронная компонентная база (ЭКБ) востребована во множестве радиоэлектронных систем различных типов и назначений. Одним из важнейших компонентов СВЧ ЭКБ были и остаются усилители СВЧ мощности на полевых транзисторах. В связи с этим к мощным СВЧ полевым транзисторам предъявляются требования, направленные на улучшение их основных характеристик: повышение предельных рабочих частот, увеличение коэффициента усиления, выходной мощности и коэффициента полезного действия (КПД), повышение надёжности, возможность монолитной интеграции в микросхемы усилителей и в системы на кристалле.

Прогресс в развитии СВЧ ЭКБ в последние годы в значительной степени связан с развитием мощных СВЧ полевых транзисторов, основными активными элементами в диапазоне частот от единиц до сотен ГГц остаются мощные полевые транзисторы с затвором, имеющим потенциальный барьер, образованный контактом металл – полупроводник. Мощные полевые транзисторы уже давно традиционно изготавливаются в НЕМТ (high electron mobility transistor) исполнении на основе A_3B_5 гетероэпитаксиальных структур, среди которых в лучшую сторону выделяются структуры с InGaAs и GaN каналами.

Среди транзисторов с InGaAs каналом выделяются два класса: рНЕМТ - транзисторы (pseudomorphic high electron mobility transistor) и мНЕМТ - транзисторы (metamorphic high electron mobility transistor). мНЕМТ - транзисторы в настоящее время отличаются самыми высокими показателями быстродействия. Отдельный класс составляют транзисторы с GaN каналом, они позволяют получать самые большие величины выходной СВЧ мощности.

В настоящее время магистральным направлением в области разработки мощных полевых транзисторов является разработка транзисторов на основе нитрида галлия. Считается, что традиционные мощные СВЧ ПТ в рНЕМТ исполнении на основе AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктур в ближайшее время будут практически полностью вытеснены из сантиметрового и длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн полевыми транзисторами на более широкозонных гетероструктурах, в частности, транзисторами на основе GaN гетероструктур. Однако, благодаря таким качествам как высокий коэффициент усиления, высокая линейность амплитудной характеристики, хорошая надёжность, долговременная стабильность и отработанная технология изготовления, СВЧ НЕМТ транзисторы с InGaAs каналом еще долго будут достаточно актуальны. На момент проведения этой работы в России проведены удачные лабораторные разработки гетероструктур и при-

боров на основе GaN и SiC, но создание промышленной технологии таких гетероструктур и приборов еще далеко от завершения.

В представленной работе проведена разработка конструктивных и технологических решений для новых перспективных вариантов мощных СВЧ полевых транзисторов с InGaAs каналом на основе новых одинарных и двойных гетероструктур. Эти транзисторы получили наименования «DA-pHEMT» и «DA-DpHEMT». Гетероструктуры DA-pHEMT и DA-DpHEMT транзисторов имеют селективное легирование донорами и акцепторами (DA) и отличаются наличием высоких потенциальных барьеров, существенно усиливающих локализацию холодных и горячих электронов в слое канала.

Разработка DA-pHEMT и DA-DpHEMT гетероструктур, конструкции и технологии образцов мощных СВЧ полевых транзисторов на их основе проведена с максимальной адаптацией к уже имеющимся в России технологиям.

Образцы разработанных DA-DpHEMT транзисторов для см - диапазона длин волн на частоте 10 ГГц показали почти двукратное увеличение коэффициента усиления и удельной выходной мощности, равной 1 Вт/мм, характерных для DpHEMT лучших зарубежных аналогов. DA-DpHEMT транзисторы с InGaAs каналом для мм - диапазона длин волн на частоте 67 ГГц показали малосигнальный коэффициент усиления более 14 дБ. что превосходит мировой уровень и обосновывает актуальность разработки.

Цель работы.

Разработка на основе нового типа гетероструктур и технологии СВЧ полевых транзисторов с InGaAs каналом нового класса транзисторов с повышенной удельной выходной мощностью и коэффициентом усиления.

Постановка задачи - для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

- разрабатывалась и апробировалась в мощных СВЧ полевых транзисторах оригинальная конструкция DA-DpHEMT гетероструктуры с локализуемыми потенциальными барьерами сформированными с помощью селективного донорно – акцепторного легирования;

- в приближении объемных механизмов рассеяния разрабатывалась оригинальная квантово - гидродинамическая модель полевого разогрева электронов в квантовой яме DA-DpHEMT транзисторов;

- с целью оптимизации гетероструктур исследовались особенности переноса электронов в различных вариантах DA-DpHEMT гетероструктур с потенциальными барьерами, локализующими электроны в слое канала;

- с целью уменьшения температуры в канале транзистора исследовались тепловые режимы для многосекционных транзисторов с учетом локализации отдельных источников тепла и разрабатывалась оригинальная конструкция эффективного теплоотвода;

- разрабатывались оригинальные конструкции и отдельные технологические процессы для мощных СВЧ DA-DpHEMT транзисторов, обеспечивающие монолитную интеграцию транзисторов в микросхемы усилителей см - и мм - диапазонов.

- изготавливались и исследовались образцы DA-DpHEMT транзисторов для см - и мм - диапазонов длин волн;

Объектом исследования служат DA-DpHEMT гетероструктуры для мощных полевых СВЧ HEMT транзисторов и мощные полевые СВЧ DA-DpHEMT транзисторы.

Предметом исследования служат – конструкции гетероструктур для мощных полевых СВЧ HEMT транзисторов, конструкции DA-DpHEMT транзисторов, конструкции омических контактов, конструкции затвора и соответствующие технологии изготовления.

Научная новизна. В диссертационной работе впервые получены следующие результаты:

1. Теоретически исследованы особенности полевого разогрева электронов в HEMT и в DA-DpHEMT транзисторах с GaAs и InGaAs каналами, а также в HEMT транзисторах с GaN каналом, [2, 5, 6, 22].

2. В приближении объемных механизмов рассеяния разработана оригинальная квантово - гидродинамическая модель полевого разогрева электронов в квантовой яме DA-DpHEMT транзисторов, [M1, 3, 5, 12, 32].

3. Показано, что сформированные с помощью селективного легирования донорами и акцепторами локализирующие барьеры в DA-DpHEMT транзисторах с InGaAs каналом и с AlGaAs - интерфейсом канала увеличивают стационарную дрейфовую скорость и всплеск дрейфовой скорости до величин, превышающих аналогичные величины в DpHEMT транзисторах с таким же InGaAs каналом и с AlInAs - интерфейсом канала до 1.5 раз, [M1, 4, 5, 13].

4. В DA-DpHEMT транзисторах для см - и мм - диапазонов длин волн предложено формировать алмазоподобные теплоотводы на боковых стенках заземляющих отверстий, что позволяет до двух раз уменьшить перегрев DA-DpHEMT транзистора относительно корпуса при толщине подложки 100 мкм и ширине секций затворов 150 мкм, [19-21].

5. Разработанные мощные полевые СВЧ DA-DpHEMT транзисторы для см - диапазона показали удельную выходную СВЧ мощность и коэффициент усиления в 1.5 – 2 больше, чем у полевых транзисторов на традиционных DpHEMT структурах. СВЧ DA-DpHEMT транзисторы для мм - диапазона показали малосигнальный коэффициент усиления (MSG) более 15 дБ в диапазоне частот 25 – 55 ГГц, более 10 дБ при частоте 67 ГГц, [7, 28, 10, 32].

6. Показано, что DA-DpHEMT транзисторы на основе гетероструктур с rip - потенциальными барьерами, усиливающими локализацию горячих

электронов в канале транзистора при 22 % содержании индия в слое канала, позволяют получать пробивное напряжение «затвор – сток» более 30 В при увеличении расстояния затвор - сток до 0.9 мкм без падения коэффициента усиления, [10, 12, 32].

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная в приближении объемных механизмов рассеяния квантово - гидродинамическая модель транспорта электронов в квантовой яме DA-DpHEMT транзисторов обеспечивает возможность расчёта статических и динамических характеристик гетероструктур, показавших для различных конструкций гетероструктур изменение амплитуды всплеска дрейфовой скорости электронов в несколько раз.

2. Двойные DA-DpHEMT и обращенные DA-pHEMT гетероструктуры отличаются усиленной локализацией горячих электронов в слое канала, усиленным размерным квантованием, дающим при толщинах слоя канала менее 15 нм разность энергий между нижними размерно-квантовыми уровнями в разы больше энергии оптического фонона в арсениде галлия.

3. Введение в двойные DA-DpHEMT и обращенные pHEMT структуры DA - потенциальных барьеров, усиливающих локализацию горячих электронов в канале транзистора, позволяет до 1.5 раз увеличить статическую дрейфовую скорость и амплитуду всплеска дрейфовой скорости электронов.

4. Формирование омических контактов истока и стока на боковых поверхностях мезы DA-DpHEMT транзисторов позволяет исключить влияние верхнего акцепторного слоя на сопротивления контактов и получать контакты с удельным переходным сопротивлением 0.3 Ом·мм.

5. DA-DpHEMT транзисторы с 22% содержанием индия в слое канала при увеличении расстояния «затвор – сток» до 0.9 мкм обеспечивают получение пробивных напряжений «затвор – сток» более 30 В без уменьшения коэффициента усиления в мм – диапазоне длин волн.

6. Формирование алмазоподобного покрытия на стенках заземляющих отверстий, сформированных под секциями истоков, позволяет до двух раз уменьшить перегрев DA-DpHEMT транзисторов относительно корпуса при толщине подложки 100 мкм и ширине секций затворов 150 мкм.

7. DA-DpHEMT транзисторы на основе гетероструктур с pin - потенциальными барьерами, усиливающими локализацию горячих электронов в канале, позволяют в 1.5 раза увеличить удельную выходную мощность и более чем в 2 раза коэффициент усиления полевых транзисторов не только в сантиметровом, но и в миллиметровом диапазонах длин волн.

Практическая ценность работы.

1. Построена модель полевого разогрева электронов в канале DA-DpHEMT транзистора, учитывающая вид поперечной волновой функции электронов в квантовой яме гетероструктуры. Модель позволяет рассчитывать распределение во времени всплеска дрейфовой скорости, тем самым определять перспективность использования в составе транзисторов различных вариантов гетероструктур, позволяет провести выбор оптимального состава, толщин слоев и профиля легирования в гетероструктурах [5, 6, 10, 12].

2. Предложен новый тип гетероструктур, получивших название «DA-DpHEMT структуры» с потенциальными барьерами, усиливающими локализацию горячих электронов в слое канала для мощных СВЧ полевых транзисторов. DA-DpHEMT структуры использованы в составе разработанного нового класса мощных СВЧ полевых транзисторов (DA-DpHEMT) [П1].

3. Разработаны конструкции и изготовлены DA-DpHEMT гетероструктуры с локализующими барьерами, пригодные для использования в составе мощных СВЧ транзисторов для см - и мм - диапазонов длин волн [П1, П5-П9, М1, 11].

4. На основе DA-DpHEMT гетероструктуры разработаны конструкции мощных СВЧ транзисторов для см - и мм - диапазонов длин волн с учетом технологических возможностей как фото, так и электронно-лучевой литографии. Показано, что благодаря высокой точности позиционирования фотолитографического степпера можно формировать Г - затворы с длиной основания 0.12 и более мкм высокопроизводительными методами фотолитографии и, тем самым, обеспечить серийное изготовление транзисторов как для см -, так и для мм - диапазонов при рабочих частотах 10–100 ГГц [8, 10].

5. Разработан и апробирован ряд вспомогательных технологий [17, 18]:
- формирование мезы транзистора с плоскими наклонными стенками,
- удаление окисленных слоев и слоев с дефектами от плазменных обработок методом окисления этих слоев и селективного удаления окислов,
- формирование в одном чипе Г – затворов при различных ориентациях козырьков относительно ножек затворов.

6. Результаты работы использовались в ряде ОКР «АО «НПП «ИСТОК»».

7. Разработанные транзисторы и МИС на их основе поставляются в АО «НПП «Салют», АО «НИИЭП», АО «НПО НИИИП-НЗиК», АО «НПП «Алмаз», АО «НПП «Радар ммс», АО «НПП «Салют-25», АО «РЗП», АО «Светлана-Электронприбор», АО «УМЗ», АО «УПКБ «Деталь», АО «ЦКБА», АО «ЦНИРТИ им. академика А.И.Берга», ОАО «ЦНПО «Ленинец», ПАО «Ярославский радиозавод», ООО «Абтроникс», ООО «ТРВ-инжиниринг», АО «ННПО имени М.В. Фрунзе», АО «НПП «Салют-27», АО «НИИМА «Прогресс», НПП «Октава», НПО «Октябрь»».

Апробация результатов работы.

На основе проведенных работ были изготовлены и апробированы экспериментальные образцы мощных СВЧ DA-DpHEMT транзисторов в режиме усиления СВЧ мощности на рабочих частотах 10, 40 и 67 ГГц.

Результаты работы опубликованы в материалах следующих международных и Всероссийских конференций:

"СВЧ - техника и телекоммуникационные технологии" («КрыМиКо») г. Севастополь: 10 - 14 сентября 2007г., 13 - 17 сентября 2010г., 12 - 16 сентября 2011г., 10 - 14 сентября 2012г., 8 - 13 сентября 2013г., 7 - 13 сентября 2014г., 6 - 12 сентября 2015г., 10 - 16 сентября 2017г., 9 - 15 сентября 2018г., 8 - 14 сентября 2019г. 7 - 11 сентября 2020 г., 5 - 10 сентября 2021 г.

«Микроэлектроника СВЧ», Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ: 4-7 июня 2012 г. «11 Российская конференция по физике полупроводников», Санкт-Петербург, 16 - 20 сентября 2013 г. «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 2-5 июня 2014 г. «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 1-4 июня 2015 г. «Электроника и микроэлектроника СВЧ», VI Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ: 2-5 июня 2014 г., 1 - 4 июня 2015 г., 29 мая - 1 июня 2017 г., 30 мая - 4 июня 2021 г.

Пульсар – 2013 "Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА" 24 - 25 октября 2013 г.

10 Международная научно-практическая конференция «Нанотехнологии – производству 2014» г. Фрязино Московской обл., 2 - 4 апреля 2014 г.

8-я Международная научно – практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ – электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ» НИЯУ «МИФИ» г. Москва: 24 мая 2017, 24 мая 2018 г., 28 октября 2020 г., 19-20 мая 2021 г., 25-26 мая 2022 г.

Всего 34 публикации в материалах конференций.

Публикации. По материалам диссертации автором опубликованы одна монография, 33 статьи в журналах из списка ВАК для защиты кандидатских и докторских диссертаций (из них 2 статьи без соавторов), в том числе 16 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных, 34 публикации в материалах конференций, соавторство в 9 патентах РФ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы и приложений. Выполнена на 391 странице текста, содержит 111 рисунков, 19 таблиц и список литературы из 305 наименований.

Личный вклад: статьи 17-18 написаны автором лично. В статьях 1-16 принято участие в постановке задачи, разработке гетероструктур, получении и обсуждении результатов. В статьях 19-34 принято участие в постановке задачи, в получении и обсуждении результатов.

На основе разработанной автором DA-DpHEMT гетероструктуры им предложена новая конструкция DA – DpHEMT мезатранзисторов, конструкции и технологии формирования омических контактов, T- и Г- затворов.

Содержание и результаты работы.

Во введении дано обоснование актуальности темы работы, определены цели и задачи исследований, перечислены основные результаты, выводы, научные положения, выносимые на защиту. Обоснована практическая значимость работы.

В первой главе проведено исследование дрейфового переноса электронов в транзисторных HEMT гетероструктурах на основании которого предложены и описаны способы улучшения характеристик HEMT транзисторов.

В разделе 1.1 описаны основные особенности дрейфового переноса электронов в транзисторных HEMT гетероструктурах.

Показано, что увеличение выходной СВЧ мощности HEMT транзисторов сводится к решению следующих задач:

1. Увеличение стационарных величин: максимальной величины стационарного тока стока, достигаемого при подаче на затвор положительного напряжения, к увеличению стационарного пробивного напряжения «исток - сток» при подаче на затвор напряжения отсечки.

При этом максимальная величина стационарного тока стока тем больше, чем больше поверхностная плотность электронов в канале и их дрейфовая скорость под затвором при открытом канале. Величина пробивного напряжения «исток - сток» при подаче на затвор напряжения отсечки определяется особенностями конструкции и технологии HEMT транзисторов.

2. Увеличение быстродействия транзистора на заданной рабочей частоте, сводимое к уменьшению времени установления другой, изменившейся по отношению к исходной, стационарной выходной ВАХ - как результата быстрого изменения потенциала затвора.

В разделе 1.2 теоретически проанализирован полевой разогрев электронов в транзисторных эпитаксиальных структурах без размерного квантования, показано, что гидродинамические модели отличаются большей точностью описания по отношению к температурным моделям [2, 6].

Показано, что при усилении поперечного пространственного переноса электронов из канала сильно уменьшается дрейфовая скорость продольного дрейфа электронов, что приводит к уменьшению удельной выходной СВЧ

мощности. Выявлена сильная связь расположений области локализации домена сильного поля и области выделяемой тепловой мощности с поперечным пространственным переносом электронов. Показано, что при одинаковых эффективных длинах затвора транзистор с GaAs каналом обладает преимуществом по величине максимальной частоты усиления по току по отношению к транзистору с GaN каналом [7, 22, 28].

В работах, приведенных в разделе 1.2, установлено следующее:

В полевых транзисторах, изготавливаемых на основе гетероструктур с селективным легированием донорами, в худшую сторону на характеристики транзистора влияет поперечный перенос разогретых электронов из слоя канала. Такой поперечный пространственный перенос электронов приводит к увеличению концентрации электронов в широкозонном слое, примыкающем к слою канала и к уменьшению концентрации электронов в слое канала.

Поперечный перенос горячих электронов из слоя канала в соседний широкозонный слой приводит к жесткой локализации домена сильного поля в канале под стоковым краем затвора.

Несмотря на большую величину статической дрейфовой скорости электронов в максимуме ее полевой зависимости, быстродействие мощного СВЧ транзистора с GaN каналом не выше быстродействия мощного СВЧ транзистора с GaAs каналом даже при искусственном задании величины слабополевой подвижности электронов в GaAs такой же, как в GaN. Зависимости частоты усиления по току от длины затвора показали, что транзисторы на основе GaAs имеют большее быстродействие, чем транзисторы на основе GaN, при равных и малых величинах подвижности электронов [22].

В разделе 1.3 проанализирован полевой разогрев электронов в транзисторных DA-DpHEMT эпитаксиальных структурах с поперечным размерным квантованием. DA-DpHEMT структуры имеют встроенную в структуру глубокую потенциальную яму с большой крутизной боковых стенок, которая сформирована с помощью селективного донорно – акцепторного (DA) легирования широкозонных слоев, формируемых выше и ниже слоя канала и слоев спейсеров. В результате встраивания в транзисторную структуру локализирующих барьеров обеспечивается увеличение максимальной величины тока стока и заметное увеличение удельной выходной СВЧ мощности транзисторов. DA-DpHEMT структуры отличаются усиленной локализацией холодных и горячих электронов в слое канала и ослаблением их рассеяния. Эти барьеры образуют стенки квантовой ямы структуры и ослабляют поперечный перенос горячих электронов из слоя канала в слой AlGaAs, окружающие канал. Формирование локализирующих барьеров с помощью селективного донорно – акцепторного легирования обеспечивает отсутствие в структуре глубоких DX – центров [7, 28].

Потенциальные барьеры в квантовой яме транзисторной DA-DpHEMT гетероструктуры по своей сути аналогичны потенциальным барьерам в диодных pin – структурах. В отличие от них, в DA-DpHEMT гетероструктурах обеспечивается избыточное легирование донорами, причем с помощью выбора высоты локализирующих барьеров обеспечивается отсутствие дырок.

Проведено обоснование введения локализирующих барьеров в состав гетероструктур. Результаты теоретического анализа разогрева электронов в канале при их переносе от истока к стоку под действием внешнего электрического поля показали, что их кинетическая энергия может существенно превышать энергию, необходимую для выхода из слоя InGaAs канала [7, 28].

Приведено объяснение ослабления рассеяния электронов при размерном квантовании в структурах с локализирующими потенциальными барьерами. При поперечном размерном квантовании в квантовой яме DA-DpHEMT – структуры уменьшается количество разрешенных состояний для поперечной компоненты квазиимпульса, в которые могут быть рассеяны электроны, причем этот полезный эффект усиливается при увеличении глубины и сужении квантовой ямы, дающих усиление размерного квантования. Показано, что ослабление рассеяния происходит в результате уменьшения количества разрешенных состояний для поперечных компонент квазиимпульсов электронов, находящихся в размерно-квантованной потенциальной яме зоны проводимости. По этой причине вероятность актов рассеяния электронов, при которых в результате рассеяния происходит изменение поперечной компоненты их квазиимпульса, оказывается заметно уменьшенной.

Построена квантово – гидродинамическая модель продольного дрейфа электронов в DA-DpHEMT гетероструктурах. Модель учитывает продольный перенос электронов по трем слоям гетероструктуры: по узкозонному каналу и по обрамляющим его широкозонным слоям структуры. Учитывается поперечный перенос электронов между слоями квантовой ямы структуры и перенос электронов между Γ , L и X - долинами. Величины поверхностных концентраций электронов в слоях структуры были связаны с вероятностями нахождения в них электронов, что позволяет связать частоту рассеяния электронов с функциями, задаваемыми для частот рассеяния электронов в каждом слое. Для квантовой ямы DA-DpHEMT гетероструктуры концентрации электронов в ее слоях зависят от величин квадратов модулей волновых функций электронов, находящихся в размерно – квантовых состояниях, что обеспечивает учет эффекта размерного квантования. Построенная модель позволяет рассчитывать полевую зависимость стационарной дрейфовой скорости и зависимость от времени всплеска дрейфовой скорости электронов в различных вариантах pHEMT, DpHEMT, DA-DpHEMT структур [5, 6, 10, 12].

Уравнения гидродинамической части модели имеют следующий вид:

Уравнения динамики изменения импульса (1-2) и энергии (1-3) электронов с учетом p_j - вероятности нахождения электронов в слоях квантовой ямы структуры при учете слоя канала ($j=1$) и двух одинаковых по составу слоев (для каждого $j=2$), обрамляющих слой канала, имеет следующий вид:

$$n_S^j = n_S \cdot p_j, \text{ где } n_S^j = \int_{X_j} \sum_i n_i \cdot |\Psi_i(x)|^2 dx + \int_{X_j} n_C(x) dx, \quad \mathbf{v} = \sum_j \mathbf{v}_j \cdot p_j \quad (1-1)$$

$$\frac{\partial(m^*(\varepsilon) \cdot \mathbf{v}(t))}{\partial t} = q \cdot \left\{ \begin{array}{l} E - \frac{m^*(\varepsilon)V \cdot m_1^*(\varepsilon)V_{S1}(\varepsilon)E_{S2}(\varepsilon)p_2}{m_1^*(\varepsilon)V_{S1}(\varepsilon)m_2^*(\varepsilon)V_{S2}(\varepsilon)} \\ - \frac{m^*(\varepsilon)V \cdot m_2^*(\varepsilon)V_{S2}(\varepsilon)E_{S1}(\varepsilon)p_1}{m_1^*(\varepsilon)V_{S1}(\varepsilon)m_2^*(\varepsilon)V_{S2}(\varepsilon)} \end{array} \right\} \quad (1-2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = q \cdot \{E \cdot \mathbf{v}(t) - [E_{S1}(\varepsilon) \cdot \mathbf{p}_1 + E_{S2}(\varepsilon) \cdot \mathbf{p}_2] \cdot V_S(\varepsilon)\} \quad (1-3)$$

$$V_S(\varepsilon) \equiv \frac{m_1^*(\varepsilon) \cdot V_{S1}(\varepsilon) \cdot m_2^*(\varepsilon) \cdot V_{S2}(\varepsilon)}{\left[m_1^*(\varepsilon)p_1 + m_2^*(\varepsilon)p_2 \right] \cdot \left[m_1^*(\varepsilon)V_{S1}(\varepsilon)p_2 + m_2^*(\varepsilon)V_{S2}(\varepsilon)p_1 \right]} \quad (1-4)$$

$$m^*(\varepsilon) \equiv m_1^*(\varepsilon) \cdot p_1 + m_2^*(\varepsilon) \cdot p_2 \quad (1-5)$$

В выражениях (1-1) - (1-5) введены обозначения: n_S – просуммированная по всем слоям гетероструктуры поверхностная концентрация электронов, находящихся в зоне проводимости, p_j - вероятность нахождения электрона в слое с индексом « j ». Слагаемое $\int_{X_j} \sum_i n_i \cdot |\Psi_i(x)|^2 dx$ описывает по-

верхностную концентрацию электронов, находящихся в « i » состояниях размерного квантования. Слагаемое $\int_{X_j} n_C(x) dx$ описывает поверхностную

концентрацию электронов, находящихся в состояниях непрерывного спектра зоны проводимости (над квантовой ямой структуры и вне ее). V - частота рассеяния электронов, которое, в основном, происходит в слое канала и в близлежащих слоях, окружающих слой канала, v_j - частота рассеяния в слое структуры, которому присвоен номер « j ». $V_{Sj}(\varepsilon)$, $E_{Sj}(\varepsilon)$ – статические зависимости дрейфовой скорости электронов и напряженности продольного электрического поля от энергии « ε », $\varepsilon = \varepsilon(E)$. Эти зависимости извлекают-

ся из результатов расчетов методом Монте-Карло стационарных полевых зависимостей дрейфовой скорости $V_{sj}(E)$ и кинетической энергии $\varepsilon_{sj}(E)$ для материалов каждого слоя структуры с индексом « j ». $V_s(\varepsilon)$ - статическая величина дрейфовой скорости электронов во всей структуре. $V(t)$ - дрейфовая скорость электронов, m^* - эффективная масса плотности состояний, усредненные по долинам, E - задаваемая источником питания напряженность продольного электрического поля, разогревающего электроны.

Величины вероятностей p_j находятся в результате совместного решения системы уравнений Шредингера и Пуассона.

Расчитанные зонные диаграммы, полевые зависимости стационарной дрейфовой скорости и зависимости всплеска дрейфовой скорости от времени дали возможность провести выбор потенциально лучших вариантов гетероструктур и на их основе впервые разработать полевые СВЧ транзисторы, в которых увеличенные дрейфовые скорости электронов получены в результате формирования в структурах глубоких квантовых ям с сильным размерным квантованием. Расчеты показали, что по величине всплеска дрейфовой скорости разработанные DA-pHEMT и DA-DpHEMT гетероструктуры существенно превосходят традиционные гетероструктуры в исполнениях pHEMT и DpHEMT, причем разработанные варианты гетероструктур перспективны для использования в составе мощных СВЧ транзисторов, предназначенных для работы как в см - так и в мм - диапазонах длин волн.

Теоретический анализ показал, что прямые двойные DA-DpHEMT гетероструктуры с InGaAs каналом обладают преимуществом по отношению к DpHEMT структурам с аналогичным каналом при использовании в мощных СВЧ полевых транзисторах, от которых требуется максимальная величина выходной СВЧ мощности. Для задач предварительного усиления очень слабых входных СВЧ сигналов (без обеспечения максимальной величины выходной СВЧ мощности) потенциальным преимуществом обладает обращенная DA-pHEMT структура с верхним и нижним локализирующими барьерами из набора слоев AlAs/GaAs. Высокий коэффициент усиления мощности в транзисторах на основе таких обращенных структур обусловлен более сильным изменением формы квантовой ямы при подаче на затвор внешнего потенциала, более сильным изменением энергии размерно – квантовых уровней и концентрации электронов в структуре [13-15].

Во второй главе приведено описание и результаты разработки мощных полевых СВЧ DA-DpHEMT транзисторов для см - и мм - диапазонов.

Разработка DA-DpHEMT транзисторов проводилась на двух вариантах конструкции DA-DpHEMT гетероструктур (таблицы 1 и 2), выращенных в ИФП имени А.В. Ржанова СО РАН методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Riber Compact 21. В таблицах 1 и 2 введено обозначение: МС – монослой, имеющий толщину 0.283 нм.

Первый вариант конструкции DA-DpHEMT гетероструктур предназначался для практической проверки эффективности введения в типичную современную DpHEMT гетероструктуру с селективным δ :Si - легированием донорами и $\text{In}_{0.165}\text{Ga}_{0.835}\text{As}$ каналом локализирующих pin – потенциальных барьеров. Измерения характеристик образцов транзисторов показали, что первый вариант гетероструктур (таблица 1) может быть успешно использован в составе транзисторов для см - диапазона длин волн.

Второй вариант DA-DpHEMT гетероструктур (таблица 2) по своей сути аналогичен первому, но существенно изменен для усиленного подавления миграции доноров в слой канала в процессе роста структуры и для усиления размерного квантования в квантовой яме структуры.

Изменения, введенные во второй вариант DA-DpHEMT структур:

1. Увеличена высота и крутизна pin – потенциальных барьеров, усиливающих локализацию горячих электронов в слое канала.

2. Увеличена толщина GaAs матриц, содержащих донорные δ :Si – слои.

3. В $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ слои, окружающие GaAs матрицы с донорными δ :Si – слоями, введены слои AlAs/GaAs с цифровым составом по Al. Введение AlAs/GaAs слоев с цифровым составом по Al позволило уменьшить толщину спейсеров и сглаживающих GaAs слоев.

4. Увеличено содержание индия в слое канала – выращивался $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ слой канала.

5. Уменьшена до 10 нм толщина слоя $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ канала.

6. Исключен стоп – слой из $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, в котором $x = 0.86 \div 0.9$.

Измерения характеристик транзисторов показали, что второй вариант гетероструктур (табл. 2) может быть успешно использован в транзисторах как для сантиметрового, так и для миллиметрового диапазонов длин волн.

В разделе 2.1 приведены использованные в работе основные направления улучшения характеристик DA-DpHEMT транзисторов. Первое направление связано с разработкой улучшенной конструкции DA-DpHEMT гетероструктуры, второе направление связано с улучшением конструкции и технологии DA-DpHEMT транзистора.

В части улучшения DA-DpHEMT гетероструктур учитывалось, что оптимальная конструкция DA-DpHEMT гетероструктуры должна обеспечивать, по возможности, максимальную концентрацию электронов в канале и максимальную среднюю дрейфовую скорость электронов под затвором транзистора. В части выбора технологии выращивания DA-DpHEMT гетероструктур был сделан выбор молекулярно-лучевой эпитаксии.

На момент проведения разработки DA-DpHEMT транзисторов технология молекулярно-лучевой эпитаксии обеспечивает отличную воспроизводимость характеристик структур, в том числе с обеспечением возможности формирования мономолекулярных слоев при производительности, достаточной для промышленного производства.

В части улучшения конструкции DA-DpHEMT транзисторов учитывалось, что на рабочих частотах оптимальная конструкция мощного DA-DpHEMT транзистора должна обеспечивать максимально возможный ток стока, достижимый при подаче положительного потенциала на затвор и максимальные пробивные напряжения «затвор - сток» и «затвор - исток».

Разработанная конструкция DA-DpHEMT транзистора показывает рекордные для HEMT транзисторов с InGaAs каналом величины выходной СВЧ мощности. При этом обеспечивается возможность монолитной интеграции в состав микросхемы усилителя СВЧ мощности, а с помощью алмазоподобного покрытия, сформированного на боковых стенках заземляющих отверстий, обеспечивается возможность дополнительного отвода тепла [19].

В части технологии разработанная конструкция DA-DpHEMT транзистора отличается максимальным использованием «сухих» процессов на основных операциях травления элементов конструкции транзистора [17, 18].

Вместо жидкостного травления максимально используются различные варианты плазмохимического травления, что при производстве транзисторов существенно улучшает воспроизводимость размеров конструкции (включая критически важную толщину подзатворного слоя в транзисторе).

Как следствие, улучшается воспроизводимость характеристик при серийном производстве транзисторов.

При формировании элементов конструкции транзистора жидкостное травление применено для удаления областей, в которых сосредоточены дефекты, образовавшиеся в результате плазмохимического травления. Эти области предварительно подвергаются окислению, затем образовавшийся окисел удаляется в травителе, обладающем сильной селективностью травления по отношению к материалам слоев гетероструктуры, диэлектрических слоев и слоев металлизации [17, 18].

Таблица 1. DA-DpHEMT структура, вариант 1, (1 МС = 0.283 нм).

№	Слой структуры для DA-DpHEMT транзисторов см - диапазона.	Легирование, (см ⁻²)	Толщины слоев, (нм)
0	Подложка SI-GaAs, $\langle 100 \rangle$, толщина 620 мкм	-	-
1	GaAs - буфер	-	450
2	Сверхрешетка (СР) Al _{0.25} Ga _{0.75} As/GaAs, 12 периодов	-	5.7/5.3
3	Слой Al _{0.25} Ga _{0.75} As	-	100
4	Нижний акцепторный слой Al_{0.25}Ga_{0.75}As : Be	6.0·10¹²	15
5	Барьерный слой Al _{0.25} Ga _{0.75} As	-	5
6	Нижняя стенка нижней GaAs матрицы	-	2 МС
7	Нижний δ : Si слой	(7.7÷8.2)·10 ¹²	-
8	Верхняя стенка нижней GaAs матрицы	-	2 МС
9	Спейсер Al _{0.25} Ga _{0.75} As	-	3
10	Сглаживающий слой GaAs	-	3
11	Слой канала In _{0.165} Ga _{0.835} As	-	14
12	Сглаживающий слой GaAs	-	1.5
13	Спейсер Al _{0.25} Ga _{0.75} As	-	3
14	Нижняя стенка верхней GaAs матрицы	-	2 МС
15	Верхний δ : Si слой	(7.0÷7.5)·10 ¹²	-
16	Верхняя стенка верхней GaAs матрицы	-	2 МС
17	Барьерный слой Al _{0.25} Ga _{0.75} As	-	7
18	Верхний акцепторный слой Al_{0.25}Ga_{0.75}As : Be	4.0·10¹²	8
19	Подзатворный слой Al _{0.25} Ga _{0.75} As	-	6
20	Стоп - слой Al _{0.86} Ga _{0.14} As	-	3
21	Контактный слой n^- - GaAs	-	27
22	Контактный слой n^+ - GaAs : Si	20·10 ¹²	52

Таблица 2. DA-DrHEMT структура, вариант 2, (1 МС = 0.283 нм).

№	Слой структуры для DA-DrHEMT транзисторов см - и мм - диапазонов.	Легирование, (см ⁻²)	Толщины слоев, (нм)
0	Подложка SI-GaAs, $\langle 100 \rangle$, толщина 620 мкм	-	-
1	GaAs - буфер	-	450
2	Сверхрешетка (СР) Al _{0.25} Ga _{0.75} As/GaAs, 12 периодов	-	5.7/5.3
3	Слой Al _{0.25} Ga _{0.75} As	-	100
4	Нижний акцепторный (А) слой Al_{0.25}Ga_{0.75}As : Be	3.82 · 10¹²	15
5	AlAs	-	3МС
6	GaAs	-	8МС
7	AlAs	-	3МС
8	Нижняя стенка нижней GaAs матрицы	-	3.5МС
9	Нижний δ : Si слой	6 · 10¹²	-
10	Верхняя стенка нижней GaAs матрицы	-	6МС
11	AlAs	-	3МС
12	GaAs	-	6МС
13	AlAs	-	3МС
14	GaAs	-	3МС
15	Слой канала In_{0.22}Ga_{0.78}As	-	10
16	GaAs	-	3МС
17	AlAs	-	2МС
18	GaAs	-	4МС
19	AlAs	-	3МС
20	Нижняя стенка верхней GaAs матрицы	-	3.5МС
21	Верхний δ : Si слой	9.5 · 10¹²	-
22	Верхняя стенка верхней GaAs матрицы	-	6МС
23	AlAs	-	3МС
24	GaAs	-	6МС
25	Al _{0.25} Ga _{0.75} As - слой	-	3.0
26	GaAs	-	6МС
27	AlAs	-	3МС
28	Верхний акцепторный слой Al_{0.25}Ga_{0.75}As : Be	3.86 · 10¹²	8
29	Подзатворный слой Al_{0.25}Ga_{0.75}As	-	25
30	Контактный слой n ⁻ - GaAs	-	27
31	Контактный слой n ⁺ - GaAs : Si	20 · 10 ¹²	52

В разделе 2.2 приведены описание конструкции, состав слоев, разработанных двух вариантов DA-DpHEMT гетероструктур и результаты измерений эффекта Холла [7, М1, 28, П1].

Результаты, измерений эффекта Холла показали, что введенные в первый вариант гетероструктур изменения позволили при температуре $T=300$ К увеличить холловскую подвижность электронов от величины $\mu=5300$ $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ до величины $\mu=5780$ $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при увеличении поверхностной концентрации электронов от $n_s=4.0\cdot 10^{12}$ см^{-2} до $n_s=4.73\cdot 10^{12}$ см^{-2} при уменьшении толщины слоя InGaAs канала от 14 нм до 10 нм. Очень большая суммарная поверхностная концентрация доноров во втором варианте DA-DpHEMT гетероструктур, равная $1.45\cdot 10^{13}$ см^{-2} , при которой удалось получить столь большую величину холловской подвижности электронов, что косвенно подтверждает получение усиленной локализации электронов в слое канала.

В разделе 2.3 приведено описание и результаты разработки экспериментальных образцов DA-DpHEMT транзисторов для см - и мм - диапазонов длин волн. Топология этих транзисторов универсальна: при уменьшенных размерах «затвор – исток», «затвор – сток» и длины затвора она обеспечивает работу транзисторов в мм - диапазоне длин волн для частот до 100 ГГц.

Образцы DA-DpHEMT транзисторов для см – диапазона на основе первого варианта гетероструктур.

Приведено описание и обсуждение результатов измерений вольт – амперных характеристик и СВЧ параметров DA-DpHEMT транзисторов для см - диапазона длин волн.

Анализ результатов измерений показал следующее:

1. Измеренные величины удельной выходной СВЧ мощности, полученные в транзисторах на основе первого варианта DA-DpHEMT гетероструктур, позволяют заключить, что введение потенциальных барьеров, усиливающих локализацию холодных и горячих электронов в слое канала полностью оправдалось и позволило более чем в 1.5 раза увеличить удельную выходную СВЧ мощность.

2. Измеренная в импульсном режиме максимальная величина удельной выходной СВЧ мощности для DA-DpHEMT транзисторов составила 1.81 Вт/мм при КПД 50.7% и коэффициенте усиления 9.8 дБ. Величина 1.81 Вт/мм в 2 раза превосходит характерную для DpHEMT транзисторов величину 0.9 Вт/мм.

Приведены результаты апробации работы DA-DpHEMT транзисторов в составе тестовых схем усилителей СВЧ мощности для см – диапазона [31].

Показано, что в гибридных усилительных каскадах мощные полевые DA-DpHEMT транзисторы с селективным донорно - акцепторным легированием обеспечивают выходную СВЧ мощность, более чем в 1.5 раза превышающую выходную мощность усилителей с транзисторами на традиционной DpHEMT гетероструктуре.

В импульсном режиме работы при входной мощности 600 мВт и напряжении на стоке 9.5 В на частоте 9.2 ГГц выходная мощность гибридного усилительного каскада на DA-DpHEMT транзисторе с шириной затвора 4.8 мкм составила более 6 Вт. Получены практически равные значения выходной мощности и КПД при ширине затвора DA-DpHEMT в 1.4 раза меньше, чем ширина затвора в DpHEMT.

Коэффициент усиления тестовой схемы усилителя с DA-DpHEMT транзистором более чем в 1.5 раза превышает коэффициент усиления схемы с DpHEMT транзистором.

Показано, что в X – диапазоне частот гибридный усилительный каскад, построенный на DA-DpHEMT транзисторе, может выдавать удельную выходную СВЧ мощность величиной более 1 Вт/мм на единицу ширины затвора в рабочей полосе частот шириной более 2 ГГц.

Образцы DA-DpHEMT транзисторов для мм – диапазона на основе второго варианта гетероструктур.

Описаны конструкция, вольт – амперные характеристики и СВЧ параметры экспериментальных образцов DA-DpHEMT транзисторов для мм - диапазона длин волн. В топологиях этих образцов использован принцип сбора двух потоков электронов, управляемых двумя затворами и переносимых из двух истоков на один общий сток [10, 12, 32, 33].

Для мм - диапазона длин волн были изготовлены 4 варианта топологий тест - образцов мощных СВЧ DA-DpHEMT транзисторов с $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ каналом с 2, 4, 8 и с 16 секциями затвора. Применялась стандартная технология, используемая при производстве DpHEMT транзисторов с T - затворами. Длина основания T-образного затвора составила величину, примерно равную 0.12 мкм. Тест - образцы DA-DpHEMT транзисторов были изготовлены с разными ширинами единичных секций затвора W_g , разными расстояниями исток - затвор L_{SG} и затвор - сток L_{GD} .

Тест – образцы показали максимальную удельную величину тока стока 0.7 А при ширине затвора равной 1 мм, достигаемую при подаче на затвор положительного потенциала. Напряжение пробоя «затвор – сток» составило 21 В при расстоянии «затвор - сток» $L_{GD} = 0.4$ мкм и 31 В при $L_{GD} = 0.9$ мкм.

В результате измерений максимального стабильного коэффициента усиления (MSG) тест - образцов в режиме малого сигнала получены результаты:

1. Наблюдается увеличение MSG при увеличении расстояния «затвор – сток», при этом максимальная величина малосигнального коэффициента усиления получена при наибольшей из заданных в тест - образцах транзисторов величине $L_{GD} = 0.9$ мкм при напряжении V_{gs} , соответствующем А – режиму усиления. При этом MSG оказывается почти постоянным при $V_{gs} = -0.2$ В в диапазоне частот 25 - 55 ГГц.

2. Тест – образцы DA-DpHEMT транзисторов показали большой коэффициент усиления не только при отрицательных напряжениях, подаваемых на затвор, но и при нулевом $V_{gs} = 0$ и даже при положительном напряжении «затвор – сток» $V_{gs} = +0.5$ В. В DpHEMT транзисторах с селективным легированием только донорами, предназначенных для работы в мм - диапазоне длин волн, как правило, усиление даже при $V_{gs} = 0$ В слабое.

3. В широком диапазоне изменения V_{gs} максимальная величина MSG на частоте 40 ГГц равная 17÷19 дБ достигается при сравнительно большой величине ширины секций затвора, равной 90 мкм.

4. В узком диапазоне изменения V_{gs} самая большая величина MSG на частоте 40 ГГц, равная 20 дБ, достигается при самой большой величине ширины отдельных секций затвора, равной 150 мкм.

5. В тест – транзисторах с 4 секциями затвора также, как и в тест – транзисторах с 2 секциями затвора, сохранилась большая величина MSG при нулевом и положительном напряжении на затворе, равном +0.5 В.

6. Для «В» и «С» – режимов усиления лучший набор параметров: $L_{SD} = 1.4$ мкм, $L_{SG} = 0.4$ мкм, $L_{GD} = 0.9$ мкм, показавший среди прочих образцов наибольшую величину MSG при напряжении на затворе V_{gs} , близком к напряжению отсечки: $V_{gs} = (-4) \div (-3)$ В.

7. Для «В» и «С» – режимов усиления наибольшая величина MSG при напряжении на затворе, близком к напряжению отсечки $V_{gs} = (-4) \div (-3)$ В выявлена при ширине секций затвора, задаваемой в диапазоне величин $W_{fg} = 90 \div 110$ мкм.

8. Величина максимального стабильного коэффициента усиления MSG составила более 15 дБ при измерениях на частоте 40 ГГц и более 10 дБ при

измерениях на частоте 67 ГГц. Получены максимальная частота усиления по току $f_t = 45$ ГГц и максимальная частота генерации $f_{max} = 250$ ГГц.

9. Продемонстрировано, что разработанные тест - образцы DA-DpHEMT транзисторов с длиной основания затвора 0.12 мкм могут успешно работать в мм - диапазоне вплоть до длины СВЧ волны, равной 3 мм.

Оценки показали, что HEMT транзисторы с селективным донорно – акцепторным легированием потенциально могут работать в усилительном режиме даже в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Для субмиллиметрового диапазона предполагается формирование InGaAs канала с большим содержанием индия и замена состава слоев, обрамляющих слой канала – предполагается использование AlInAs слоев.

Усиление на СВЧ в DA-DpHEMT транзисторах при нулевом постоянном напряжении на затворе [9, 29].

Образцы DA-DpHEMT транзисторов, предназначенные для работы при нулевом постоянном напряжении на затворе, отличаются увеличенными толщинами подзатворного слоя. Достаточно большая толщина подзатворного слоя ($\approx 12 \div 16$ нм) приводит к тому, что при даже сравнительно большом (более 1 В) положительном потенциале на затворе не происходит обращения в ноль высоты верхнего локализирующего барьера, а это на порядки уменьшает поток надбарьерного переноса электронов из канала в затвор.

Измерения СВЧ параметров таких образцов проводились в импульсном режиме на частоте 10 ГГц. Получено, что с ростом входной СВЧ мощности выходная СВЧ мощность растет практически линейно в широком диапазоне изменения величины входной СВЧ мощности, а затем происходит быстрое насыщение величины выходной мощности (разница в величине мощности при 1 дБ и 3 дБ компрессии коэффициента усиления мала).

На частоте 10 ГГц при удельной выходной мощности $1.5 \div 1.73$ Вт/мм экспериментальные образцы DA-DpHEMT транзисторов показали коэффициент усиления около 12.5 дБ в рабочих точках с нулевым и с небольшим положительным ($0.1 \div 0.2$ В) постоянным напряжением на затворе.

В третьей главе описаны тепловые режимы, распределения температуры и результаты расчетов максимальной температуры в транзисторах.

Описаны особенности конструкции и технологии DA-DpHEMT транзисторов для см - и мм - диапазонов длин волн.

В разделе 3.1 приведено описание особенностей отвода тепла в мощных СВЧ транзисторах. Показано, что в одном из основных вариантов монтажа мощного СВЧ транзистора – соединением подложки транзистора с основанием корпуса основной отвод тепла происходит через подложку в корпус. Поэтому выбор толщины подложки в транзисторе, а также выбор топологии

истоков, затворов и стоков должны проводиться исходя из условия отвода выделяемой в транзисторе тепловой мощности в основание корпуса без превышения максимально допустимой температуры транзистора [20, 21].

В разделе 3.2 приведено описание тепловых режимов работы мощных СВЧ полевых транзисторов для см - и мм - диапазонов длин волн.

Исходно определялось распределение источников тепла в транзисторах. Приведено исходное уравнение баланса энергий между электронами и кристаллической решеткой и выражение для плотности потока энергии электронов при дрейфовом переносе электронов по каналу, на основе которых выводится уравнение теплопроводности. Стационарный вариант этого уравнения использован для расчета распределений температуры.

Исследованы тепловые режимы НЕМТ транзисторов для см – диапазона длин волн. Проанализирован тепловой разогрев в FET, DpHEMT и в DA-DpHEMT транзисторах, определены размеры и место расположения основных источников тепла. Расчет трехмерного распределения температур для транзисторов проводился на основе уравнения стационарной теплопроводности с учетом температурной зависимости коэффициента теплопроводности SI-GaAs подложки. Приведены результаты расчета максимальной температуры T_{max} и распределений температуры в DA-DpHEMT транзисторах с обычными и перспективными вариантами конструкций при различных тепловых режимах работы. Расчеты проводились с помощью программы CST STUDIO для двух вариантов топологии транзисторов [1, 19].

Первый вариант: конструкция транзистора для см - диапазона.

Второй вариант: конструкция транзистора для см - и мм - диапазона.

Результаты расчетов распределений температуры показали следующее:

1. Для стандартной топологии и конструкции DpHEMT транзисторов максимальная температура наиболее велика и превышает 150°C при удельной тепловой мощности менее 2.5 Вт/мм.

2. Для стандартной топологии и конструкции DpHEMT транзисторов при наличии под подложкой алмазного интерфейса максимальная температура транзистора уменьшается. Такая конструкция потенциально позволяет увеличить максимально допустимую тепловую мощность, выделяемую в транзисторе примерно на 20 – 30 %, но окончательно проблему достижения хорошего отвода тепла не решает. В частности, в полевых транзисторах с InGaAs каналом и с SI-GaAs подложкой теплоотвод будет достаточно эффективен только при сильном уменьшении толщины подложки - до величин менее 25 мкм, что нежелательно из-за уменьшения прочности транзистора.

3. Для стандартной топологии и конструкции DpHEMT транзисторов при наличии верхнего теплового интерфейса из алмазоподобного покрытия (АПП) потенциально обеспечивается отвод тепла, усиленный до 2 раз.

В этом варианте конструкции принцип усиления отвода тепла заключается в следующем. Обеспечивается дополнительный отвод тепла от источников вверх, далее по АПП теплому мосту этот дополнительный поток тепла отводится на периферию транзистора с последующим переносом тепла через SI-GaAs подложку в медное основание на корпусе транзистора.

Такое конструктивное решение содержит необходимость решения очень сложной проблемы, возникающей из-за рассогласования постоянных кристаллических решеток и коэффициентов термического расширения для АПП, гетероструктур и металлов в конструкции транзистора, на которых формируется АПП. При таком рассогласовании большие необходимые толщины верхнего теплового интерфейса на основе АПП (как показали результаты расчетов, примерно равные 1 – 5 мкм для эффективного усиления отвода тепла) и относительно малые толщины нижележащих слоев могут приводить к разрушению конструкции транзистора (может произойти отрыв шляпки затвора, разрушение слоя Si_3N_4) в результате действия термических напряжений. В транзисторе с верхним АПП тепловым интерфейсом при испытаниях в тепле, холоде и термоциклах происходит дополнительное усиление термомеханических напряжений, которое может привести к разрушению элементов конструкции транзистора.

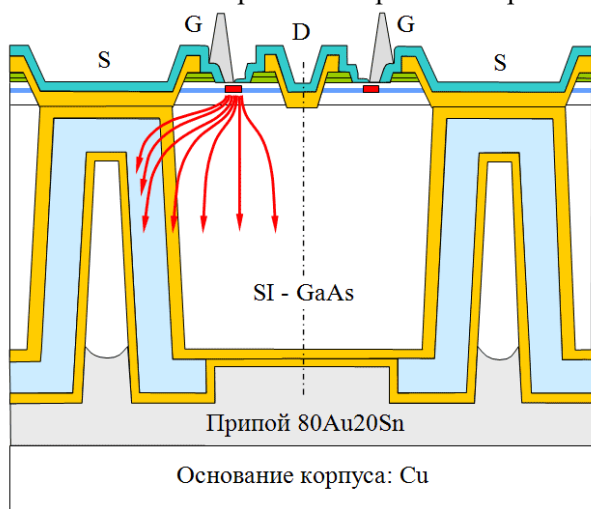
4. Наиболее перспективным по возможности эффективного отвода тепла и обеспечению необходимой прочности конструкции оказался вариант конструкции транзистора, в котором под всеми секциями истоков S, размещенных между секциями затворов G и стоков D, в гетероструктуре сформированы сквозные отверстия с заземляющей металлизацией и отводящим тепло слоем АПП. Для топологии и конструкции DA-pHEMT и DA-DpHEMT транзисторов для см - и мм - диапазонов с алмазоподобным тепловым интерфейсом в заземляющих отверстиях (рис. 1) расчеты показали уменьшение до 2 раз максимального перегрева транзистора относительно корпуса [19].

В конструкции DA-pHEMT и DA-DpHEMT транзисторов (рис. 1) показано, что набор секций затворов G и стоков D разделен секциями истоков S. Под металлизацией секций истоков в гетероструктуре сформированы сквозные отверстия с боковыми стенками, покрытыми заземляющей исток металлизацией. При этом группы секций затворов и стоков, расположенные между заземленными истоками, включают в себя только 2 секции затворов и стоков. Соответственно, в транзисторе между двумя заземляющими отверстиями расположены только два локальных источника тепла.

В том случае, если эти источники будут достаточно сильно приближены к АПП теплоотводам, расположенным на боковых стенках заземляющих отверстий, например, на расстояние 5 – 15 мкм при толщине SI-GaAs подложки, равной 50 – 150 мкм, по АПП теплоотводу происходит сильный дополнительный отвод тепла от источников.

Такое подключение сильного дополнительного теплоотвода по АПП приведет к существенному уменьшению максимальной температуры транзистора, что подтвердили проведенные расчеты.

В частности, расчеты показали, что уменьшение до 2 раз максимального перегрева транзистора относительно корпуса получается при ширине источников тепла равной 150 мкм и при достаточно большой толщине SI-GaAs подложки - равной 100 мкм, последнее особенно важно для обеспечения достаточно большой механической прочности кристалла транзистора.



- | | |
|--|--|
| - InGaAs канал | - контактные слои n^+ и n^- - GaAs |
| - металлизация истоков, стоков и заземляющих отверстий | - нитрид кремния |
| - Г - затворы | - алмазоподобное покрытие |
| - источники тепла | - потоки тепла из одного источника |

Рис. 1. Схематичный вид фрагмента сечения DA-DpHEMT транзистора с Г – затворами для см - и мм - диапазонов.

В разделе 3.3 описаны особенности конструкции и технологии DA-DpHEMT транзисторов для см - и мм - диапазонов длин волн. В общем случае локализирующие потенциальные барьеры могут формироваться с помо-

щью селективного донорно - акцепторного легирования и нескольких гетеропереходов. Перспективно совмещение pin – локализирующих барьеров и гетеропереходов слоев с цифровым составом по одному из материалов, например, набор слоев AlAs/GaAs с цифровым составом по алюминию.

Приведены особенности конструкции DA-DpHEMT гетероструктур для полевых транзисторов см - и мм - диапазонов длин волн [M1, 11, 12].

Второй вариант разработанных DA-DpHEMT гетероструктур полностью сохраняет идеологию улучшения DpHEMT структур, заложенную в первом варианте DA-DpHEMT гетероструктур (табл. 1, 2), во второй вариант DA-DpHEMT гетероструктур введено много существенных изменений.

Введенные изменения увеличили глубину квантовой ямы слоя канала, уменьшили ширину квантовой ямы гетероструктуры, усилили локализацию донорной примеси внутри GaAs матриц.

Описано формирование мезы и омических контактов в DA-DpHEMT транзисторах. Присутствие в DA-DpHEMT гетероструктуре верхнего акцепторного слоя, имеющего высокий уровень легирования, не позволяет без дополнительных операций сформировать хорошие омические контакты истока и стока в классическом исполнении – при котором плоскость контакта почти полностью параллельна поверхности пластины [17].

Современные мощные DpHEMT и DA-DpHEMT транзисторы, как правило, монолитно интегрированы с входными и выходными СВЧ – линиями, схемами согласования и линиями питания. При этом все эти элементы конструкции располагается на поверхности полуизолирующей подложки - вне площади мезы, занимаемой непосредственно транзистором. Таким образом, сам транзистор, например, в составе усилителя мощности, локализован в собственной меза – структуре, имеющей боковые стенки, на поверхность которых выходит слой $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ - канала.

Формирование мезаструктуры открыло возможность формирования омических контактов истока и стока непосредственно к слою канала на боковых стенках мезы (рис. 2), [17]. В результате проведения соответствующих технологических работ установлено следующее:

1. Объединение в одном процессе плазмо - химического травления слоев гетероструктуры в плазме BCl_3 и распыления слоев гетероструктуры в плазме Ag (РИЛТ – процесс) при сопутствующем распылении и частичном травлении клиновидного края оплавленного фоторезиста позволяет формировать плоские боковые стенки у транзисторной мезы в DA-DpHEMT гетероструктуре с углом наклона по отношению к нормали к поверхности структуры, равным 15 – 30 град.

2. При формировании омических контактов на основе металлизации Au:Ge/Ni/Au или Ge/Au/Ni/Au необходимо учитывать уменьшенную толщину Au:Ge или Ge/Au на боковых стенках мезы и необходимость сохранения на боковых стенках избыточности этой толщины по отношению к количеству эвтектики Au:Ge, растворенной в рекристаллизованных областях омических контактов.

3. Избыточность толщины эвтектики Au:Ge или слоев Ge/Au позволяет получить большую концентрацию Ge в рекристаллизованных областях контактов к InGaAs каналу. Тем самым обеспечен интенсивный туннельный перенос электронов сквозь барьеры омических контактов «металл – (n^+ - InGaAs)», давший малое удельное сопротивление омических контактов равное 0.3 Ом/мм. Избыточность толщины Au:Ge или Ge/Au на боковых стенках мезы обеспечивается достаточно большой их толщиной и уменьшением времени вжигания контактов по отношению к времени вжигания для омических контактов с горизонтальной плоскостью контакта.

4. Предположительно, метод формирования омических контактов непосредственно к слою канала, выходящему на боковые стенки транзисторной мезы, может быть с успехом использован в конструкции омических контактов для AlGaIn/AlN/GaN полевых транзисторов с GaN каналом, при этом омические контакты истока и стока формируются аналогичным способом к слою GaN канала, выходящему на боковые стенки мезы транзистора.

Описана конструкция и технология T- и Г- затворов для DA-DpHEMT транзисторов см - и мм - диапазонов длин волн [18].

Методы формирования Г- и T- затворов в DA-DpHEMT транзисторах практически ничем не отличаются от методов формирования в pHEMT и DpHEMT транзисторах, однако имеется ряд особенностей их формирования, позволяющих повысить быстродействие и величину MSG - максимального стабильного коэффициента усиления СВЧ мощности. При формировании Г- и T- затворов в DA-DpHEMT транзисторах использовались плазменные и плазмохимические технологии. Для прецизионной остановки процесса травления контактных слоев из $n^+ - GaAs$ и $n^- - GaAs$ использовался эффект образования стоп-слоя из AlF_3 при начале плазмохимического травления подзатворного слоя из нелегируемого $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$.

Жидкостное травление собственного окисла является единственной операцией травления с применением жидких химических реагентов, которая проводилась на этапах формирования мезы транзистора, омических контактов и затвора, все другие операции травления проводились с использованием плазменных и плазмохимических процессов. Травление собственного окисла

в $\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}$ (1:1) отличается высокой селективностью: этот травитель не действует на полупроводниковые слои гетероструктуры, которые не покрыты собственным окислом. По этой причине примененный процесс жидкостного травления собственного окисла по селективности и точности остановки процесса травления хорошо совмещается с прецизионными процессами плазмохимического травления, точность остановки которых обеспечивается образованием тонкого AlF_3 стоп – слоя.

Для удаления верхней части подзатворного слоя $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$, в которой произошло накопление дефектов при реактивном ионно-лучевом травлении мезы транзистора, контактных слоев $n^+ - \text{GaAs}$, $n^- - \text{GaAs}$ и затворного слоя Si_3N_4 , использовалась оригинальная методика удаления этих слоев, предусматривающая двукратное удаление собственного окисла [18].

Второе удаление собственного окисла проводилось после проведения принудительного окисления пластины в смеси газов N_2+O_2 в долевом соотношении 0.8/0.2 при $T=20^\circ\text{C}$. В результате разработки конструкции и технологии Т- и Г- затворов для DA-DpHEMT транзисторов см - и мм - диапазонов длин волн получены следующие основные результаты:

1. Использование фотолитографии и двухслойного фоторезиста при вскрытии окна в слое затворного диэлектрика (нитрида кремния) показало возможность формирования небольшого положительного наклона боковых стенок и сглаженной вершины окна при реактивном ионном травлении затворного диэлектрика в плазме SF_6/O_2 . Аналогичная форма окна в затворном диэлектрике может быть сформирована при использовании электроннолучевой литографии по двухслойному электронорезисту, например, по PMGI-ZEP с помощью реактивного ионного травления затворного диэлектрика.

2. Форма окон в затворном диэлектрике (рис. 2) исключает теневой эффект при напылении металлизации затвора и дает возможность формирования Т- затвора с малой длиной основания (≈ 0.12 мкм) за одну операцию обратной фотолитографии при использовании двухслойного фоторезиста. Для формирования ножки и шляпки Т- затвора можно применить двухслойный фоторезист, например, SF9/SPR700.

3. Получаемая форма окна в затворном диэлектрике позволяет избежать образования трещин в металлизации Г- затвора и устранить проблему смыкания стенок ножки Т- затвора. При наклонном напылении металлизации Г- затвора можно использовать окно в затворном диэлектрике, размер которого в 2 и более раз превосходит длину основания затвора и более толстый (в 2 и более раз) слой затворного диэлектрика.

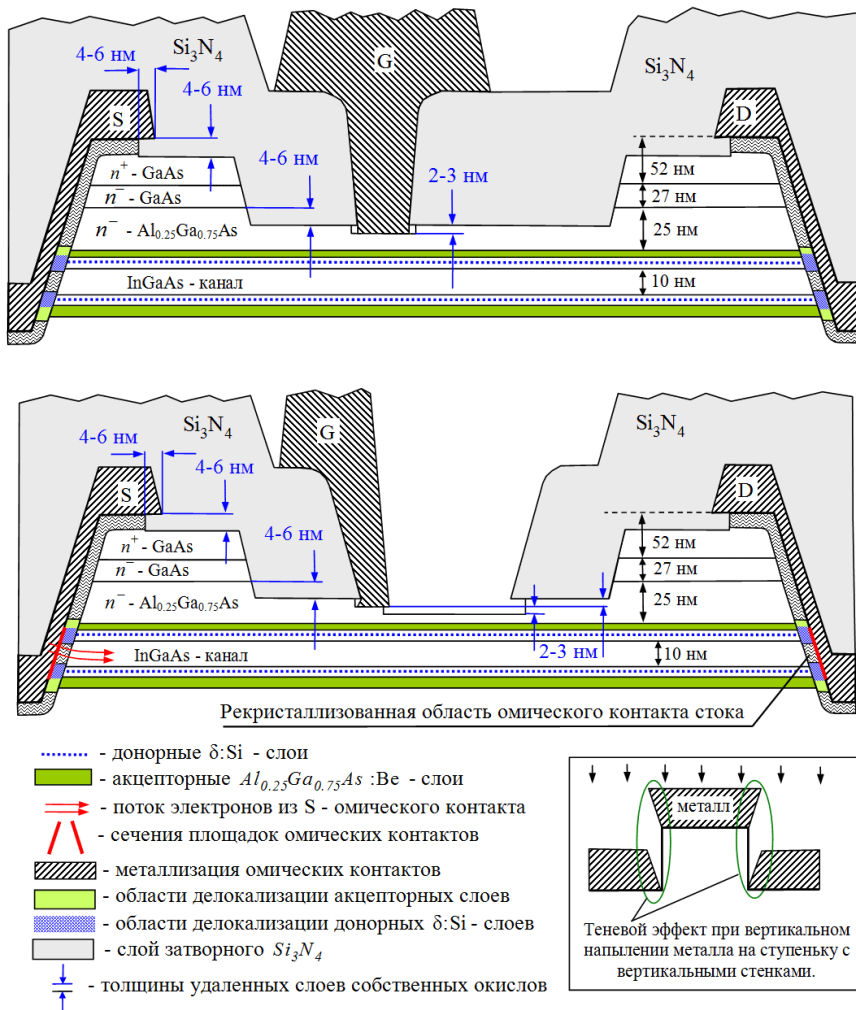


Рис. 2. Схематичный вид сечения DA-DpNEMT меза - транзисторов с T – и Г – затворами. Защитный слой Si_3N_4 не показан.

4. Показано, что при использовании двухслойного фоторезиста и метода наклонного напыления металлизации с помощью только одной операции фотолитографии возможно формирование ступенек из нитрида кремния, имеющих небольшой наклон боковых стенок (14 – 15 град.), сглаженный верхний угол и Г- затворов с длиной основания от 0.12 – 0.15 мкм.

5. Учитывая, что Г- затвор имеет козырек, сформированный только в промежутке «исток – ножка затвора» и простоту снижения сопротивления

затвора в направлении его ширины за счет большей высоты ножки, можно утверждать, что при одинаковых длинах основания затвора Г- затвор обладает технологическим преимуществом по отношению к Т- затвору и меньшей эффективной длиной.

Описано формирование коротких Г-затворов в DA-DpHEMT транзисторах см - и мм - диапазонов с применением фотолитографических процессов экспонирования резистов.

В универсальной конструкции DA-DpHEMT транзисторов для см - и мм - диапазонов предполагается использование Г-затворов с противоположным направлением козырьков относительно продольной оси координат (рис. 1). При этом в каждой секции транзистора, расположены две секции заземленных истоков, один общий сток и две секции Г - затворов с различными направлениями козырьков, что не позволяет использовать одновременное напыление металлизации всех секций затворов, проводимое при наклоне пластины. Для формирования Г-затворов с длиной основания 0.12 – 0.15 мкм и более, при вертикальном напылении металлизации предложен метод, использующий высокую точность позиционирования фотолитографического степпера. При проведении технологических работ установлено следующее:

1. Использование фотолитографии и двухслойного фоторезиста при вскрытии окна в слое затворного диэлектрика (нитрида кремния) дает возможность формирования положительного наклона его боковых стенок и сглаженной вершины окна при реактивном ионном травлении Si_3N_4 в плазме SF_6/O_2 (рис. 2).

2. Относительно малая длина основания затвора, равная 0.12 – 0.15 мкм, обеспечивается высокой точностью совмещения фотолитографического степпера при относительно большой длине экспонирующего излучения (365 нм). Для некоторых степперов, например, фирмы Nikon, эта величина составляет 0.06 мкм по уровню $\pm 3\sigma$, это означает, что 99.7 % всех совмещаемых с фотошаблоном структур будут иметь рассовмещение не более ± 60 нм, 95.4 % всех структур – не более ± 40 нм, 68.3 % – не более ± 20 нм.

3. Предварительное уменьшение толщины нитрида кремния до 0.05 – 0.1 мкм в области расположения основания затвора позволяет сформировать окно длиной 0.12 – 0.15 мкм в нитриде кремния при хорошей очистке вскрытой поверхности подзатворного слоя $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ от остатков Si_3N_4 .

4. Применение двухслойного фоторезиста и вертикального напыления металлизации затвора с учетом самосовмещения расположений затвора и окна в слое нитрида кремния позволяют вскрыть в нем окно и сформировать Г - затворы с противоположной ориентацией козырьков при использовании одного процесса фотолитографии.

Описаны DA-DpHEMT транзисторы для см- и мм- диапазонов с уменьшенной длиной канала.

Уменьшение длины канала достигается как за счет уменьшения длины козырьков металлизации омических контактов истока и стока, так и за счет исключения выступа контактных слоев за пределы этих козырьков.

Плазмохимическое вскрытие окна в контактных слоях $n^+ - GaAs$ и $n^- - GaAs$ проводится при использовании маски, в роли которой выступает Au - металлизация омических контактов. Такая конструкция транзистора позволяет не только увеличить быстродействие, но и исключить отдельную операцию фотолитографии, необходимую для вскрытия окна в контактных слоях. Перед операциями формирования затворного слоя из Si_3N_4 , напыления металлизации затвора и перед операцией формирования защитного слоя из Si_3N_4 проводится удаление собственного окисла. Важно, что в областях удаляемых собственных окислов располагаются практически все дефекты, введенные в слои гетероструктуры в процессе проведения операций плазмохимического травления. Эта особенность удаления дефектов от плазменной обработки, покрытие полупроводниковых и металлических поверхностей слоями нитрида кремния при обеспечении ровных краев металлизации истока, затвора и стока (без выступов на краях, играющих роль локальных концентраторов напряженности внешнего электрического поля) предполагает получение больших пробивных напряжений «затвор – исток» U_{BGS} и «затвор - сток» U_{BGD} - не меньше величин, полученных в конструкции для мм - диапазона.

Для DA-DpHEMT мм - диапазона длин волн эти величины составляют: $U_{BGS} = 10$ В и $U_{BDG} = 31$ В при длине «затвор – сток» $L_{GD} = 0.9$ мкм.

Аналогичные величины для DA-DpHEMT см - диапазона: получены величины $U_{BGS} = 10$ В и $U_{BDG} = 45$ В, но при этом величина $U_{BDG} = 45$ В имела место при длине «затвор – сток» $L_{GD} = 1.5$ мкм.

В заключении сформулированы основные полученные результаты:

Разработаны новые DA-DpHEMT гетероструктуры с потенциальными барьерами, усиливающими локализацию горячих электронов в канале транзистора и новые конструкции мощных полевых транзисторов с рабочими частотами в диапазоне 10 – 100 ГГц перспективные для промышленного изготовления.

Разработаны новые конструкции мощных DA-DpHEMT транзисторов, отличающиеся увеличенными удельной выходной СВЧ мощностью, напря-

жениями пробоя, усиленным отводом тепла, обеспечивающие возможность промышленного изготовления в монолитном исполнении новых конструкций микросхем СВЧ усилителей.

Предложена концепция и разработаны конструкции DA-pHEMT гетероструктур с донорно - акцепторными локализирующими потенциальными барьерами, обеспечивающие среднюю дрейфовую скорость электронов под затвором транзисторов на их основе в полтора раза больше дрейфовой скорости электронов под затвором транзисторов на основе традиционных DpHEMT гетероструктур при сравнимой и большей поверхностной плотности электронов.

Разработан новый вариант DA-DpHEMT гетероструктур с усиленным размерным квантованием в квантовой яме структуры, показавший рекордные для гетероструктур с аналогичным InGaAs каналом характеристики: при $T=300$ К получена холловская подвижность электронов $\mu=5800$ см²/(В·с) при поверхностной концентрации электронов $n_s=4.8 \cdot 10^{12}$ см⁻².

Показано, что новая конструкция разработанных образцов DA-DpHEMT транзисторов при длине основания затвора 0.12 мкм может успешно работать в см - и в мм - диапазонах вплоть до длины СВЧ волны, равной 3 мм. При этом в образцах напряжение пробоя «затвор – сток» составляет 31 В при расстоянии «затвор – сток» равном 0.9 мкм, что существенно превышает аналогичную величину в DpHEMT транзисторах с аналогичным InGaAs каналом и позволяет получить увеличенную выходную СВЧ мощность не только в см -, но и в мм - диапазоне длин волн.

Предложена новая конструкция DA-DpHEMT транзисторов с алмазоподобным покрытием на стенках заземляющих отверстий, которая согласно результатам расчётов позволяет при сохранении расстояния между затворами двукратно уменьшить максимальный перегрев транзистора относительно корпуса при ширине секций транзистора 150 мкм и толщине подложки в транзисторе 100 мкм.

Теоретически исследованы особенности нелокального разогрева электронов в гетероструктурах с локализирующими потенциальными барьерами, а также тепловые свойства транзисторов на их основе.

Разработана в приближении объемных механизмов рассеяния квантово - гидродинамическая модель и программа расчетов статических и динамических характеристик гетероструктур, показавших для различных конструкций гетероструктур изменение амплитуды всплеска дрейфовой скорости электронов в несколько раз.

Публикации по теме диссертации

Монографии

M1. Advances in Microelectronics: Reviews, Editor Sergey Y. Yurish. K.S. Zhuravlev, D.Yu. Protasov, D.V. Gulyaev, A.K. Bakarov, A.I. Toropov, V.G. Lapin, V.M. Lukashin, A.B. Pashkovskii “New Heterostructures for Higer Power Microwave DA-pHEMTs”, 2019, volume 2, chapter 8, p. 251-287.

Публикации по теме диссертации в изданиях, индексируемых в базах данных «Web of Science» и «Scopus»

1. А.Б. Пашковский, И.В. Куликова, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, Н.К. Приступчик, Л.В. Манченко, В.Г. Калина, М.И. Лопин, А.Д. Закурдаев “Поверхностный тепловой интерфейс для мощных арсенид-галлиевых гетероструктурных полевых транзисторов” // Журнал Технической Физики, 2019, том.89, вып. 2, с.252 – 257. DOI: [10.21883/JTF.2019.02.47079.2493](https://doi.org/10.21883/JTF.2019.02.47079.2493)

2. А.В.Климова, В.М.Лукашин, А.Б.Пашковский “Поперечный пространственный перенос в полевых транзисторах на гетероструктурах с селективным легированием и границы применимости квазигидродинамических моделей” Физика и Техника Полупроводников, 2009, Т.43, В.1, стр. 113-118.

3. А.Б. Пашковский, С.И. Новиков, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин. “Двумерный электронный газ в обращенных гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием” // Письма в Журнал Технической Физики, 2017, том 43, вып. 12 с. 42 – 51. DOI [10.21883/PJTF.2017.12.44707.16718](https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.12.44707.16718)

4. А.Б. Пашковский, С.И. Новиков, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, Я.Б. Мартынов. “Особенности всплеска дрейфовой скорости электронов в DA-pHEMT” // Письма в Журнал Технической Физики, 2018, том 44, вып. 17 с. 103 – 110. DOI: [10.1134/S1063785018090092](https://doi.org/10.1134/S1063785018090092)

5. А. Б. Пашковский, А. С. Богданов, В. М. Лукашин, С. И. Новиков “Нелокальная динамика электронов в транзисторных гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием” // Микроэлектроника 2020, том 49, № 3, с. 210–225. (9). DOI: [10.31857/S0544126920030059](https://doi.org/10.31857/S0544126920030059)

6. А.А. Борисов, К.С. Журавлев, С.С. Зырин, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.А. Маковецкая, В.И. Новоселец, А.Б. Пашковский, А.И. Торопов, Н.Д. Урсуляк, С.В. Щербаков “Исследование средней дрейфовой скорости электронов в рHEMT транзисторах” // Письма в Журнал Технической Физики, 2016, том 42, вып. 16, с. 41 – 47.

7. В.М. Лукашин, А.Б.Пашковский, К.С.Журавлев, А.И.Торопов, В.Г.Лапин, А.Б.Соколов “Уменьшение роли поперечного пространственного

переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов” // Письма в Журнал Технической Физики, 2012, т. 38. в. 17, с. 84-89.

8. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, Е.И. Голант, А.А. Капралова “Перспективы развития мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием” // Физика и Техника Полупроводников, 2014, том 48, В.5, стр. 684-692.

9. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, В.Г. Лапин, С.В. Щербаков, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, А.А. Капралова “Управление положением оптимальной рабочей точки мощного гетероструктурного полевого транзистора путем формирования подзатворного потенциального барьера на основе донорно-акцепторной структуры” // Письма в Журнал Технической Физики, 2015, том 41, вып. 3 с. 81 – 87.

10. С.А. Богданов, А.К. Бакаров, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, И.А. Рогачёв, Е.В. Терёшкин, С.В. Щербаков “Полевой транзистор миллиметрового диапазона длин волн на основе псевдоморфной гетероструктуры с дополнительными потенциальными барьерами” // Письма в Журнал Технической Физики, 2021, том 47, вып. 7 с. 52 – 54 ((25)). DOI: 10.21883/PJTF.2021.07.50802.18640

11. K. S. Zhuravlev, D. Yu. Protasov, A. K. Bakarov, A. I. Toropov, D. V. Gulyaev, V. G. Lapin, V. M. Lukashin, and A. B. Pashkovskii “New Type of Heterostructures for Powerful pHEMT Transistors” ISSN 8756-6990, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2020, Vol. 56, No. 5, pp. 478–484. Published in Avtometriya, 2020, Vol. 56, No. 5, pp. 36–43. DOI: 10.3103/S8756699020050155.

12. Andrey B. Pashkovskii, Sergey A. Bogdanov, Askhat K. Bakarov , Alexandr B. Grigorenko, K. S. Zhuravlev , Vladimir G. Lapin, Vladimir M. Lukashin, Ilya A. Rogachev, Evgeniy V. Tereshkin, and Sergey V. Shcherbakov «Millimeter Wave Donor – Acceptor Doped DpHEMT», IEEE Trans. On Electron Devices, Jan. 2021, vol. 68, issue 1, p. 53-56.

13. А.Б. Пашковский, С.А. Богданов, А.К. Бакаров, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, С.Н. Карпов, Д.Ю. Протасов, И.А. Рогачёв, Е.В. Терёшкин “Всплеск дрейфовой скорости электронов в обращенных транзисторных гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами” // Письма в Журнал Технической Физики, 2022, том 48, вып. 12 с. 11 – 14. DOI: 10.21883/PJTF.2022.12.52671.19184

14. А.Б. Пашковский, С.И. Новиков, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин. «Двумерный электронный газ в обращенных гетероструктурах с донорно – ак-

цепторным легированием». Письма в Журнал Технической Физики, 2017, т. 43, в. 12, с. 42-51.

15. А.Б. Пашковский, С.А. Богданов, А.К. Бакаров, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, С.Н. Карпов, Д.Ю. Протасов, И.А. Рогачев, Е.В. Терешкин. «Всплеск дрейфовой скорости электронов в обращенных транзисторных гетероструктурах с донорно – акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами». Письма в Журнал Технической Физики, 2022, т. 48, в. 12, с. 11-14.

16. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, И.В. Пашковская. «GaN – полевой транзистор с эффективным теплоотводом на Si – подложке». Письма в Журнал Технической Физики, 2023, т. 49, в. 2, с. 10-13.

Публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК не индексируемых в базах данных «Web of Science» и «Scopus».

17. Лукашин В.М. Особенности формирования омических контактов в DA-DrHEMT. Электронная техника, серия 1, СВЧ - техника, 2021, выпуск 3 (550), с.15 - 25.

18. Лукашин В.М. Особенности формирования Г и Т – затворов в DA-DrHEMT транзисторах. Электронная техника, серия 1, СВЧ - техника, 2022, выпуск 1 (552), с 20 - 32.

19. В.М. Лукашин, И.В. Пашковская. Эффективный теплоотвод для DA-DrHEMT на основе алмазоподобного покрытия заземляющих отверстий. Электронная техника, серия 1, СВЧ - техника, 2022, выпуск 3 (554), с 13 - 21.

20. Бережнова П.В., Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Ратникова А.К.

“Оценка области нелокального тепловыделения в мощных гетероструктурных полевых транзисторах” Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2007, выпуск 4(492), с. 21 - 24.

21. Куликова И.В., Лапин В.Г., Лукашин В.М, Пашковский А.Б., Приступчик Н.К. “Исследование тепловых режимов мощных полевых транзисторов с донорно-акцепторным легированием” // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2017, выпуск 3(534), с. 6- 21.

22. А.Б. Пашковский., В.М. Лукашин, Я.Б. Мартынов, В.Г. Лапин, А.А. Капралова, И.А. Анисимов “Нелокальный дрейф электронов в полевых транзисторах на основе нитрида галлия”// Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2014, выпуск 4(523), с. 5- 16.

23. С.И. Новиков, А.Б. Пашковский, Я.Б. Мартынов, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.А. Маковецкая. “Особенности заполнения размерно - квантованных подзон в обращённых гетероструктурах с донорно – акцепторным

легированием” // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2018, выпуск 1(536), с. 6- 20.

24. А.А. Борисов, С.С. Зырин, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.А. Маковецкая, В.И. Новоселец, А.Б. Пашковский, Н.Д. Урсуляк, С.В. Щербаков, К.С. Журавлев, А.И. Торопов. “Анализ малосигнальных СВЧ-характеристик DA-pHEMT”// Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2016, выпуск 1(528), с. 65- 69.

25. В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, К.И. Петров, А.М. Темнов. Полевые транзисторы со смещенным затвором // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2011, выпуск 4(511), с. 59 - 71.

26. Н.А.Кувшинова, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, К.И.Петров. Мощный полевой транзистор со смещенным к истоку Г-образным затвором. Радиотехника, 2011 г. № 11, с. 90-93.

27. А.А.Капралова, В.М.Лукашин, Л.В.Манченко, А.Б.Пашковский, В.А. Пчелин. Уменьшение погрешности контактирования при измерении параметров мощных полевых транзисторов. Радиотехника, 2011, №4, с. 67-71.

28. К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, А.Б. Соколов, А.И. Торопов. “Серийный рHEMT с удельной мощностью 1,4 Вт/мм ”. Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2012, в.1(512), с. 55-61.

29. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, В.Г. Лапин, С.В. Щербаков, А.А. Капралова, К.С. Журавлев, А.И. Торопов “Мощные гетероструктурные полевые транзисторы с донорно – акцепторным легированием, эффективно работающие при нулевом смещении на затворе” // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2014, выпуск 3(522), с. 5 - 14.

30. А.А. Борисов, С.С. Зырин, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.А. Маковецкая, В.И. Новоселец, А.Б. Пашковский, Н.Д. Урсуляк, С.В. Щербаков, К.С. Журавлев, А.И. Торопов. Анализ малосигнальных СВЧ-характеристик DA-pHEMT. Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2016, выпуск 1 (528), с. 65-69.

31. А.А. Маковецкая, Д.В. Калита, В.А. Пчелин, В.Г. Лапин, А.Б. Пашковский, В.М. Лукашин, С.В. Щербаков, С.И. Новиков. “Усилительный каскад X-диапазона частот с выходной мощностью более 6 Вт на гетероструктурных полевых транзисторах с донорно – акцепторным легированием” // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2018, выпуск 1 (536), с. 25- 31.

32. С.А. Богданов, С.Н. Карпов, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, И.А. Рогачёв, Е.В. Терёшкин, С.В. Щербаков, А.К. Бакаров, К.С. Журавлев “DA-DpHEMT миллиметрового диапазона длин волн” // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2021, выпуск 2 (549), с. 19 - 31.

33. С.А. Богданов, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, С.Н. Карпов, А.Б. Пашковский, И.А. Рогачёв, Е.В. Терёшкин А.К. Бакаров, К.С. Журавлев Цифро-

вые барьеры и перспективы развития мощных полевых транзисторов с донорно – акцепторным легированием в миллиметровом диапазоне длин волн. // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2022, выпуск 3(544), с. 22 – 37.

Тезисы конференций

34. Бережнова П.В., Лукашин В.М., Пашковский А.Б. “Оценка размеров области тепловыделения в мощных полевых транзисторах на гетероструктурах с селективным легированием”. 17-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2007). Севастополь, 10-14 сентября 2007г. Материалы конференции. Севастополь: "Вебер", с. 119-120, 2007.

35. Голант Е.И., Капралова А.А., Лукашин В.М., Пашковский А.Б. “Интерференционные эффекты в двухбарьерных структурах в сильных высокочастотных электрических полях” 20-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2010). Севастополь, 13-17 сентября 2010г.: Материалы конференции. Севастополь: "Вебер", с. 884-885, 2010.

36. Капралова А. А., Лукашин В. М., Пашковский А. Б. “Особенности электронного транспорта через двухбарьерные гетероструктуры в сильных высокочастотных электрических полях ”21-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2011). Севастополь, 12-16 сентября 2011г.: Материалы конференции. Севастополь: "Вебер", с. 818-819, 2011.

37. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин. Мощный полевой транзистор на гетероструктуре с донорно-акцепторным легированием. Микроэлектроника СВЧ, Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 4-7 июня 2012 г. Сборник трудов конференции Том 1, с. 83 – 87.

38. Лукашин В. М., Пашковский А. Б., Журавлев К. С., Торопов А. И., Лапин В. Г. Подавление каналов паразитной проводимости и рост мощности гетероструктурных полевых транзисторов. 22-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2012). Севастополь, 10—14 сентября 2012г.: Материалы конференции. Севастополь: "Вебер", с. 78-79, 2012.

39. Капралова А. А., Лукашин В.М., Пашковский А.Б. Поперечный пространственный перенос электронов и особенности локализации домена сильного поля в гетероструктурных полевых транзисторах. 22-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2012). Севастополь, 10—14 сентября 2012г.: Материалы конференции. Севастополь: "Вебер", с. 153-154, 2012.

40. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин. Перспективы использования в полевых транзисторах гетероструктур с донорно-акцепторным легированием. 23-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2013). Севастополь, 8—13 сентября 2013г.: Материалы конференции. Севастополь: "Вебер", с. 122-123, 2013.

41. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, Е.И. Голант, А.А. Капралова. Особенности электронного транспорта в полевых транзисторах на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием. 23-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2013). Севастополь, 8—13 сентября 2013г.: Материалы конференции. Севастополь: "Вебер", с. 122-123, 2013.

42. К.С. Журавлев, А.К. Бакаров, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский. Мощные СВЧ - транзисторы типа рНЕМТ. *11 Российская конференция по физике полупроводников*. Санкт-Петербург, 16–20 сентября 2013. Тезисы докладов. С. 71.

43. А.А. Борисов, С.В. Щербаков, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, В.Г. Лапин, К.С. Журавлев, А.И. Торопов. Перспективы развития полевых транзисторах гетероструктур с донорно-акцепторным легированием во ФГУП НПП «ИСТОК». Пульсар – 2013 "Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА". Материалы конференции. С. 45–48, 24 – 25 октября 2013.

44. Я.Б. Мартынов, А.Б. Пашковский, Э.В. Погорелова. Лавинная инжекция в мощных полевых транзисторах. Пульсар – 2013 "Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА". Материалы конференции. С. 182 – 184, 24 – 25 октября 2013.

45. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, В.Г. Лапин, А.А. Капралова, К.И. Петров, Е.И. Голант, К.С. Журавлев, А.И. Торопов. Перспективы использования наноструктур с донорно-акцепторным легированием в производстве мощных полевых транзисторах. 10 Международная научно-практическая конференция «**Нанотехнологии – производству 2014**». г. Фрязино Московской обл., 2-4 апреля 2014. Тезисы докладов. С. 52-53.

46. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, В.Г. Лапин, А.А. Капралова, К.И. Петров, Е.И. Голант, К.С. Журавлев, А.И. Торопов. Особенности физических процессов в полевых транзисторах на наноструктурах с комбинированным типом легирования. 10 Международная научно-практическая конференция «**Нанотехнологии – производству 2014**». г. Фрязино Московской обл., 2-4 апреля 2014. Тезисы докладов. С. 54-55.

47. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, А.А. Капралова. Мощные гетероструктурные полевые транзисторы, работающие при нулевом смещении на затворе. **Электроника и микроэлектроника СВЧ**, Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 2-5 июня 2014 г. Сборник трудов конференции. С. 111 – 113.

48. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, А.А. Капралова, И.А. Анисимов “Особенности нелокального разогрева электронов в полевых транзисторах на основе нитрида галлия”. **Электроника и микроэлектроника СВЧ**. Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 2-5 июня 2014 г. Сборник трудов конференции. С. 207 – 211.

49. Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Капралова А.А. Мощные гетероструктурные полевые транзисторы, работающие при нулевом смещении на затворе. 24-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2014). Севастополь, 7—13 сентября 2014г.: Материалы конференции. Севастополь: "Вебер", с. 79-80, 2014.

50. А.Б. Пашковский, В.М. Лукашин, В.Г. Лапин, С.В. Щербаков, А.А. Капралова, К.С. Журавлев, А.И. Торопов. Полевые транзисторы на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием. **Электроника и микроэлектроника СВЧ**, Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 1-4 июня 2015 г. Сборник трудов конференции. Том 1, с. 19 – 23.

51. Я.Б. Мартынов, А.Б. Пашковский, С.И. Новиков “ Особенности нелокального разогрева электронов в полевых транзисторах на основе различных полупроводниковых материалов”. **Электроника и микроэлектроника СВЧ**, Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 1-4 июня 2015 г. Сборник трудов конференции. Том 1, с. 85 – 89.

52. А.А. Капралова, А.Б. Пашковский, В.М. Лукашин, В.Г. Лапин, С.В. Щербаков, К.И.Петров, К.С. Журавлев, А.И. Торопов. “Исследование малосигнальных СВЧ характеристик полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием”. **Электроника и микроэлектроника СВЧ**, Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 1-4 июня 2015 г. Сборник трудов конференции. Том 1, с. 99 – 101.

53. А.А. Капралова, А.Б. Пашковский, В.М. Лукашин, В.Г. Лапин, С.В. Щербаков, К.И.Петров, К.С. Журавлев, А.И. Торопов. “Малосигнальные СВЧ характеристики DA-pHEMT”. 25-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо' 2015). Севастополь, 6—12 сентября 2015г.: Материалы конференции. Севастополь: "Вебер", с. 95-96, 2015.

54. Новиков С.И., Пашковский А.Б., Лапин В.Г., Лукашин В.М. “Исследование уровней размерного квантования в обращённых гетероструктурах с

донорно – акцепторным легированием” 8-я Международная научно – практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ – электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ» 24 мая 2017 г. Москва, НИЯУ «МИФИ» Сборник трудов конференции. С. 26 – 27.

55. Пашковский А.Б. Куликова И.В. Лапин В.Г. Лукашин В.М. Приступчик Н.К. “Теплопроводящее покрытие для мощных арсенид-галлиевых гетероструктурных полевых транзисторов” **Электроника и микроэлектроника СВЧ**, VI Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 29 мая - 1 июня 2017 г. Сборник статей. С. 70 – 74.

56. Пашковский А.Б. Новиков С.И. Лапин В.Г. Лукашин В.М. “ Анализ особенностей обращённых гетероструктур с донорно – акцепторным легированием”. **Электроника и микроэлектроника СВЧ**, VI Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 29 мая – 1 июня 2017 г. Сборник статей. С.65 – 69.

57. Маковецкая А.А. Пчелин В.А. Лапин В.Г., Пашковский А.Б., Лукашин В.М., Щербаков С.В., Журавлёв К.С., Торопов А.И. “Мощный внутри-согласованный транзистор X – диапазона на основе транзистора на гетероструктуре с донорно – акцепторным легированием” **Электроника и микроэлектроника СВЧ**, VI Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 29 мая – 1 июня 2017 г. Сборник статей конференции С.192 – 195.

58. Маковецкая А.А., Пчелин В.А., Лапин В.Г., Пашковский А.Б., Лукашин В.М., Щербаков С.В., Журавлев К.С., Торопов А.И. ”GaAs ВСТ X-диапазона с удельной выходной мощностью более 1 Вт/мм”. 27-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2017). Севастополь, Крым, Россия. 10—16 сентября 2017г.: Материалы конференции. С. 71 – 77.

59. Пашковский А.Б., Куликова И.В., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Приступчик Н.К. “Перспективы использования теплопроводящих покрытий в мощных арсенид-галлиевых полевых транзисторах” 27-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2017). Севастополь, Крым, Россия. 10—16 сентября 2017г.: Материалы конференции. С. 861 – 867.

60. Пашковский А.Б., Новиков С.И., Лапин В.Г., Лукашин В.М. “Динамика квантовых уровней в обращенных гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием” 27-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2017). Севастополь, Крым, Россия. 10—16 сентября 2017г.: Материалы конференции. С. 1090 – 1096.

61. А.Б. Пашковский, С.И. Новиков, Я.Б. Мартынов, В.М.Лукашин Оценка всплеска дрейфовой скорости электронов в DA-pHEMT. 9-я Между-

народная научно – практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ – электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ» 24 мая 2018 г. Москва, НИЯУ «МИФИ» Сборник трудов конференции. С. 26 – 27.

62. Богданов С.А., Богданов Ю.М., Лапин В. Г., Лукашин В.М., Маковецкая А.А., Новиков С.И., Пашковский А.Б., Смирнов В.В., Журавлёв К.С. “Полевые транзисторы с повышенным уровнем линейности” 28-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2018). Севастополь, Крым, Россия. 9—15 сентября 2018г.: Материалы конференции. Т.1, с. 29 – 33.

63. Богданов С.А., Богданов Ю.М., Викторова Н.О., Лапин В. Г., Лукашин В.М., Новиков С.И., Пашковский А.Б., Смирнов В.В., Журавлёв К.С. “Новый метод снижения фазовых шумов генераторов на полевых транзисторах” 28-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2018). Севастополь, Крым, Россия. 9—15 сентября 2018г.: Материалы конференции. Т.1, с. 34 – 38.

64. Пашковский А.Б., Новиков С.И., Мартынов Я.Б., Лукашин В.М., Лапин В.Г. “Нелокальный разогрев электронов в DA-pHEMT гетероструктурах” 28-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2018). Севастополь, Крым, Россия. 9—15 сентября 2018г.: Материалы конференции. Т.4, с. 920 – 925.

65. Пашковский А.Б., Новиков С.И., Маковецкая А.А., Лукашин В.М., Лапин В.Г. “Всплеск дрейфовой скорости электронов в обращенных гетероструктурах ” 28-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2018). Севастополь, Крым, Россия. 9—15 сентября 2018г.: Материалы конференции. Т.4, с. 926 – 931.

66. Пашковский А.Б., Пашковская И.В., Лукашин В.М. “Физические ограничения на характеристики мощных промышленных *GaAs* и *GaN* полевых транзисторов” 29-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2019). Севастополь, Крым, Россия. 8—14 сентября 2019г.: Тезисы докладов, с. 20 – 21.

67. Пашковский А.Б., Новиков С.И., Лукашин В.М. “Феноменологическая модель нелокального разогрева электронов в полевых транзисторах с донорно – акцепторным легированием” 29-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2019). Севастополь, Крым, Россия. 8—14 сентября 2019г.: Тезисы докладов, с. 104 – 105.

Патенты и свидетельства по теме диссертации.

П1. Патент РФ на полезную модель №80069 по заявке № 2008133793. Приоритет от 19.08.2008. «Гетероэпитаксиальная структура для полевых транзисторов» // Е.И. Голант, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, Ю.Н. Свешников.

П2. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007615207. Заявка № 2007615049 от 13.12.2007, зарегистрирована 25.12.2007. «Перенос ГСЛ» // Е.И. Голант, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский.

П3. Патент РФ на полезную модель №106442 по заявке № 2011112315/28. Приоритет от 31.03.2011. Опубликовано: 10.07.2011 Бюл. № 19. «Эпитаксиальная структура с широкозонным инжектором для полевых транзисторов» // В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский.

П4. Патент РФ на полезную модель №111351 по заявке № 2011136159. Приоритет от 31.08.2011. Зарегистрировано: 10.12.2011 Полевой транзистор с увеличенным напряжением пробоя // Е.И. Голант, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский.

П5. Патент РФ на изобретение №2563319 по заявке № 2014127102. Приоритет от 02.07.2014. Зарегистрировано: 21.08.2015 Мощный полевой транзистор СВЧ // В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев.

П6. Патент РФ на изобретение №2563545 по заявке № 2014126324. Приоритет от 27.06.2014. Зарегистрировано: 25.08.2015. Мощный полевой транзистор СВЧ. // В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев.

П7. Патент РФ на изобретение №2599275 по заявке № 2015121484. Приоритет от 04.06.2015. Зарегистрировано: 14.09.2016. «Мощный полевой транзистор СВЧ на полупроводниковой гетероструктуре» В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, К.И. Петров А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев.

П8. Патент РФ на изобретение №2743225 по заявке № 2020130346. Приоритет от 14.09.2020. Зарегистрировано: 16.02.2021. «Мощный полевой транзистор СВЧ на полупроводниковой гетероструктуре» Богданов С.А., Богданов Ю.М., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С.

П9. Патент РФ на изобретение № 2781044 по заявке №2021133029/28(069483). Приоритет от 12.11.2020. Зарегистрировано: 04.10.2022. «Мощный полевой транзистор СВЧ на полупроводниковой гетероструктуре». А.Б. Пашковский, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.А. Маковецкая, С.А. Богданов, Е.В. Терешкин, К.С. Журавлев.