

На правах рукописи

ЛАПИН Владимир Григорьевич

**НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОЛЕВЫХ СВЧ
ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ
АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ**

**Специальность 05.27.01 «Твердотельная электроника,
радиоэлектронные компоненты, микро - и
наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»**

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

г. Фрязино 2019 г.

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

Официальные оппоненты:

Егоров Антон Юрьевич доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, г. С.-Петербург.

Вигдорович Евгений Наумович доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет», г. Москва.

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

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва.

Защита состоится 30 мая 2019 в 14 часов на заседании диссертационного совета Д409.001.01 на базе 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://www.istokmw.ru/avtoreferati-dissertacy/>

Автореферат разослан 15 марта 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук

Куликова И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Твердотельная сверхвысокочастотная (СВЧ) электронная компонентная база востребована для разработки огромного числа радиоэлектронных систем. При этом непосредственно к электронным компонентам постоянно предъявляются самые различные дополнительные требования. Поэтому одной из основных задач современной электроники является улучшение характеристик полупроводниковых приборов: повышение их быстродействия, рабочих частот, увеличения выходной мощности, повышение надёжности, уменьшение размеров и т.д. Важную роль также играет создание на их основе монолитных интегральных схем (МИС).

Несмотря на значительный прогресс в развитии элементной базы за последние годы, основными активными элементами в диапазоне частот от единиц до сотен ГГц остаются полевые транзисторы с барьером Шоттки (ПТШ) на арсениде галлия, других соединениях A_3B_5 , и различных гетероструктурах на их основе. Такие транзисторы термостабильны и имеют высокие характеристики в СВЧ диапазоне. Часто они более универсальны в части их применения по сравнению с гетеробиполярными транзисторами или различными типами диодов в ряде частотных диапазонов. Кроме того, технология полевых транзисторов позволяет формировать их одновременно с другими элементами в едином цикле изготовления МИС СВЧ.

Несмотря на большое количество разработок в этой области и сообщений о рекордных результатах, существует значительный разрыв по характеристикам между лабораторными образцами и серийными приборами. Первые изготавливаются на уникальном дорогостоящем и малопроизводительном оборудовании а также специальных структурах. В промышленном производстве на первое место выходят не единичные уникальные результаты, а воспроизводимость и стабильность параметров, низкая стоимость, возможность изготовления на достаточно простом и дешевом оборудовании, простых структурах и т.д.

Именно по этим причинам на мировом рынке в основном задействована небольшая группа компаний, разрабатывающих и производящих мощные полевые транзисторы и монолитные интегральные схемы на их основе.

В настоящее время в мире магистральным направлением в области разработки мощных полевых транзисторов являются

транзисторы на основе нитрида галлия. Считается, что традиционные мощные СВЧ ПТШ в исполнении рНЕМТ (pseudomorphic high electron mobility transistor) на основе псевдоморфных AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктур в ближайшее время будут практически полностью вытеснены из сантиметрового и длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн приборами на более широкозонных гетероструктурах. Однако, благодаря таким качествам как высокий коэффициент усиления, высокая линейность амплитудной характеристики, высокая надежность, долговременная стабильность и отработанная технология изготовления СВЧ транзисторы на арсениде галлия еще долго будут иметь широкое применение. Кроме того, в России, несмотря на отдельные удачные лабораторные разработки, создание промышленной технологии приборов на широкозонных гетероструктурах еще далеко от завершения.

Требования экономической независимости и технологической безопасности приводят к необходимости иметь отечественную элементную базу, параметры которой были бы сравнимы с серийными мировыми аналогами с учетом особенностей и возможностей имеющегося оборудования. Кроме того, слепое копирование западных разработок ведёт к постоянному отставанию от мирового уровня, неоправданному расходованию материальных ресурсов, а иногда и к разработкам заведомо бесперспективных направлений. Исходя из этого, специфика представленной работы заключается именно в ставке на оригинальность используемых технических решений.

Цель работы – совершенствование промышленных СВЧ транзисторов на основе арсенида галлия в части существенного улучшения параметров и повышения их воспроизводимости.

Постановка задачи - для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разрабатывались оригинальная конструкция транзистора, метод и соответствующая технология наклонного напыления самосовмещенных электродов затвора, позволяющие существенно повысить точность расположения смещенного к истоку затвора;

- разрабатывались оригинальная конструкция, способ и технология изготовления Г – образного затвора позволяющие без роста омического сопротивления формировать затвор транзистора с длиной в 2 – 3 раза меньше, чем разрешение используемого

литографического оборудования, улучшить воспроизводимость характеристик транзисторов и увеличить выход годных изделий.

- разрабатывалась конструкция DA-DpHEMT гетероструктуры с локализуемыми потенциальными барьерами на основе донорно – акцепторного легирования, подавляющими поперечный пространственный перенос электронов из InGaAs – канала.

- теоретически исследовались особенности нелокального разогрева электронов в гетероструктурах с локализуемыми потенциальными барьерами, а также тепловые свойства транзисторов на их основе.

- разрабатывались транзисторы на гетероструктурах с донорно – акцепторным легированием.

Объектом исследования служат – гетероструктуры для мощных полевых СВЧ транзисторов и мощные полевые СВЧ транзисторы с большой шириной затвора.

Предметом исследования служат – конструкции гетероструктур полевых транзисторов, конструкции транзистора и его омических и барьерных контактов и соответствующие технологии изготовления.

Научная новизна. В диссертации впервые получены следующие результаты:

1. Предложена конструкция транзистора, разработан метод и технология наклонного напыления самосовмещенных затворных электродов, позволяющие существенно повысить точность смещения затвора к истоку транзистора и повысить выход годных приборов.

2. Предложена конструкция Г - образного затвора, разработан метод наклонного напыления затворных электродов и соответствующая технологии, позволяющие формировать затвор транзистора с длиной в 2 – 3 раза меньше, чем разрешение используемого литографического оборудования, повысить воспроизводимость характеристик транзисторов и увеличить выход годных изделий.

3. Предложены гетероструктуры с донорно – акцепторным легированием, разработаны их конструкции.

4. Разработаны полевые транзисторы на гетероструктурах с донорно – акцепторным легированием имеющие удельную выходную

мощность и коэффициент усиления в 1.5 – 2 больше чем у приборов на традиционных DpHEMT структурах.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Предложенные конструкция, способ и технология наклонного напыления затворных электродов позволяют улучшить характеристики транзисторов и увеличить выход годных изделий с 5-10% до 20-40%.

2. Предложенные конструкция, способ и технология изготовления Г – образного затвора позволяют сформировать затвор транзистора с длиной в 2 – 3 раза меньше разрешения используемого литографического оборудования, улучшить воспроизводимость характеристик транзисторов и увеличить выход годных изделий.

3. Предложенные DA-DpHEMT гетероструктуры с двумя дополнительными потенциальными барьерами, позволяет в 1.5 – 2 раза увеличить коэффициент усиления и удельную выходную мощность полевых транзисторов.

Практическая ценность работы

Разработаны конструкции мощных СВЧ транзисторов, метод и технология наклонного напыления затворных электродов, позволяющие при производстве транзисторов и МИС существенно повысить точность расположения между истоком и стоком затвора, смещенного к истоку. Разработаны конструкция затвора, метод и технология наклонного напыления затворного электрода позволяющая уменьшить длину затвора транзистора до размеров существенно (в разы) меньше максимального разрешения используемой литографии без увеличения сопротивления затвора.

Разработанные методы наклонного напыления использованы при разработке параметрического ряда транзисторов (ЗПБ12 А,Б,В ЗП976 А,Б,В,Г,Д, «Плафон» «Полет»), выпускаемых серийно.

Применение этих методов позволило повысить выход годных транзисторов с 5÷10% до 20÷40% .

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

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. Фрнкзе», АО «НПП «Салют-27», АО «НИИМА «Прогресс», НПП «Октава», НПО «Октябрь».

Предложены и разработаны полевые транзисторы на гетероструктурах с донорно – акцепторным легированием имеющие в 1.5 – 2 большие коэффициент усиления и удельную выходную мощность по сравнению с транзисторами на традиционных DrHEMT – структурах.

Апробация результатов работы

Результаты работы опубликованы в материалах следующих международных и Всероссийских конференций: "GaAs 2000" Conference proceedings, 2nd-3rd October 2000, Paris, "СВЧ - техника и телекоммуникационные технологии", «КрыМикО» г. Севастополь, 11-15 сентября 2000г., 10-14 сентября 2001г., 14-18 сентября 2009г., 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.; 10 Международная научно-практическая конференция «Нанотехнологии – производству 2014», г. Фрязино Московской обл., 2-4 апреля 2014г.; Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», г. Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 4-7 июня 2012 г., 3-6 июня 2013 г., 2-5 июня 2014 г., 1-4 июня 2015 г., 29 мая - 1 июня 2017 г.; XIX координационный научно-технический семинар по СВЧ технике, пос. Хахалы Нижегородской обл., 5-7 сентября 2017 г.

Публикации. По материалам диссертации автором опубликованы одна монография, 10 статей в журналах индексируемых в международных базах данных, 23 (2 без соавторов) статьи в журналах из списка ВАК для защиты кандидатских и докторских диссертаций, 29 работ в других научных изданиях, получено 15 патентов РФ.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа выполнена на 350 страницах текста, содержит 95 рисунков, 24 таблицы и список литературы из 258 наименований.

Личный вклад: статьи 11,15, написаны автором лично.

1. В статьях (4 – 10, 16, 18 – 24, 27 – 30, 32,33) принято участие в постановке задачи, разработке транзисторов, получении, обработке и обсуждении результатов.

2. В статьях (12,25,26) принято участие в постановке задачи, разработке транзисторов и обсуждении результатов.

3. В статьях (1 – 3, 13,14,17,31) принято участие в постановке задачи и обсуждении результатов.

Содержание и результаты работы

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

В первой главе приведены результаты исследований автором причин, ведущих к разбросу параметров транзисторов, описаны методы улучшения характеристик полевых транзисторов.

В разделе 1.1. обсуждаются особенности экспериментально наблюдаемых характеристик полевых транзисторов и рассматриваются пути их улучшения.

В подразделе 1.1.1 представлены результаты измерений характеристик ряда полевых транзисторов ФГУП НПП “ИСТОК” с глубокими уровнями. Продемонстрировано, что в ряде случаев у всех приборов, изготовленных на некоторых структурах или у группы транзисторов, образующих на поверхности одной структуры локальную область достаточно больших размеров, вольтамперные характеристики (ВАХ) могут иметь аномальный вид, вызванный увеличением концентрации центров с глубокими уровнями. Корреляция между видом ВАХ и основными электрофизическими параметрами (концентрация и подвижность электронов) гетероструктур при этом не отмечалась. Подобные ВАХ наблюдались, в том числе и у транзисторов, сформированных на гетероструктурах с селективным легированием (ГСЛ) с достаточно выраженными осцилляциями Шубникова – де – Гааза, с высокими значениями подвижности и поверхностной плотности электронов. Наблюдаемые аномалии нельзя связать с током утечки по подложке, т.к. ток утечки между мезаструктурами транзисторов практически отсутствовал. Приведены типичные спектры глубоких уровней, состоящие из двух пиков, соответствующих уровням с энергиями ионизации 0,38 и 0,42 эВ, что хорошо согласуется с энергиями ионизации DX-центра в

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, легированном кремнием и концентрациями электронов в образцах различных транзисторов в диапазоне от $2 \cdot 10^{16}$ до 10^{18} см^{-3} .

В подразделе 1.1.2 экспериментально изучены процессы захвата, возникающие в арсенид-галлиевых полевых транзисторах с барьером Шоттки. Показано, что в сильных электрических полях, при которых под затвором формируется статический домен, вследствие проникновения электронов в область со свободными центрами захвата (в буферный слой либо в подложку), происходит локальная модуляция толщины канала транзистора. Этот эффект приводит к появлению зависимости крутизны и тока насыщения на ВАХ от частоты и длительности переменного сигнала, что является причиной дрейфа параметров приборов во времени. Установлено, что механизм дрейфа параметров транзистора как при работе на импульсах, так и при непрерывном режиме работы в СВЧ диапазоне частот, обусловлен аналогичными причинами.

В подразделе 1.1.3 представлены экспериментальные результаты исследования фоточувствительности арсенид-галлиевых полевых транзисторов в сильных электрических полях. Приведены данные, свидетельствующие об определяющей роли n-i перехода «канал – подложка». На ВАХ установлено наличие трех областей с разным знаком фотопроводимости. Показано, что характер фотоотклика определяется не столько природой глубоких центров вблизи n-i-перехода, возбуждаемых подсветкой, сколько процессами формирования области сильного поля и перераспределения напряжения между ней и остальной частью прибора.

В разделе 1.2 исследованы технологические способы стабилизации параметров транзисторов.

В подразделе 1.2.1 приведены зависимости характеристик барьеров Шоттки от вида и особенностей химической обработки. Установлено, что основным источником загрязнений являются остатки фоторезиста в окнах. Было обнаружено, что при приближении к краю окна в проявленном фоторезисте, количество его остатков на поверхности структуры растёт, что важно при формировании окон с размерами менее 1 мкм, в которых удаление продуктов реакции при химических обработках затруднено. Результаты позволили сделать вывод о необходимости дополнительной очистки поверхности GaAs в окнах фоторезиста для обеспечения необходимых технологических и электрических параметров. Приведены разработанные составы и время обработки в жидких очищающих растворах, режимы плазменной обработки в среде кислорода.

В подразделе 1.2.2 приведена новая технология формирования омических контактов истока и стока на основе эвтектического сплава Au:Ge, в которой использовалась металлизация контактов на основе последовательно наносимых в одном технологическом процессе слоев Ni/Au:Ge/LaB₆/Au. В этой композиции слоев наносимый первым слой Ni способствует усилению внедрения донорной примеси Ge в GaAs гетероструктуру при термообработке структур с контактами. Слой LaB₆ образует диффузионный барьер, препятствующий диффузии галлия из контакта на поверхность его металлизации, происходящей на операции вжигания металлизации контакта. Введение слоя LaB₆ в состав контакта позволило получить малое удельное сопротивление омического контакта, равное 10^{-7} Ом·см² и его высокую термостабильность. В частности, последующая термообработка в течение 40 часов при 300° С не меняла сопротивления контакта.

В разделе 1.3 приведена технология наклонного напыления металлизации затвора, позволяющая обеспечить смещение затвора в канале в сторону истока и, тем самым, снизить паразитное сопротивление между истоком и затвором, а также повысить пробивное сопротивление сток-затвор.

В подразделе 1.3.1 приведено описание конструкции многосекционного транзистора, позволяющей использовать преимущества, даваемые наклонным напылением металлизации затвора. Показано, что введение изолирующего слоя между отдельными И-З-С (исток-затвор-сток) секциями транзистора позволяет использовать наклонное напыление в технологии мощного многосекционного СВЧ транзистора. В частности, показано, что формирование этого изолирующего слоя с помощью локальной обработки ионами бора с высокой энергией, позволяет успешно решить поставленную задачу. Этот способ не исключает возможность формирования изоляции между И-З-С секциями с помощью их размещения в пределах отдельных транзисторных мезаструктур, сформированных на полуизолирующей подложке из GaAs. Для транзисторов с затвором, имеющим трапецевидную или треугольную форму поперечного сечения, получены зависимости выходной СВЧ мощности, коэффициента усиления и КПД от положения основания затвора между истоком и стоком. Формирование затвора при наклонном напылении его металлизации показан на рисунке 1.

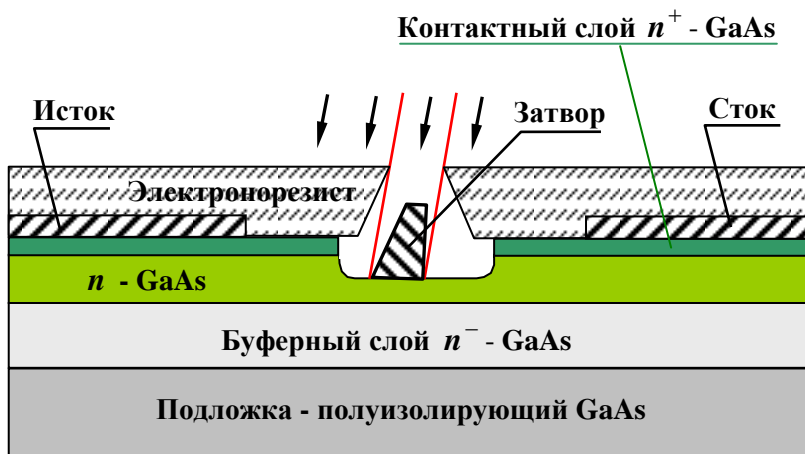


Рис. 1. Формирование затвора методом наклонного напыления его металлизации.

В подразделе 1.3.2 приведена зависимость параметров мощного СВЧ транзистора с затвором, имеющим трапециевидную или треугольную форму поперечного сечения, от угла напыления металлизации затвора. Показано, что оптимальный по выходной СВЧ мощности, коэффициенту усиления и КПД угол напыления находится в диапазоне $102^{\circ} \div 112^{\circ}$ по отношению к истоку. Приведена последовательность технологических операций изготовления транзисторов при угловом напылении металлизации затвора, выходная СВЧ мощность и коэффициент усиления при различных количествах и вариантах конструкции И-З-С секций транзисторов.

В разделе 1.4 описаны особенности конструкции и технологии мощных СВЧ транзисторов с Г-образным затвором.

Переход к затворам более сложной формы, в частности, к затворам с Т- или Г-образной формой поперечного сечения вызван крайне важной для мощных СВЧ транзисторов необходимостью предельно возможного уменьшения продольного сопротивления каждой одиночной секции затвора. Для снижения этого сопротивления (характерна величина 4 Ом при длине секции 100 мкм), на ножке затвора дополнительно формируется шляпка, что позволяет решить эту проблему. При формировании шляпки поперечное сечение одиночной секции затвора приобретает Т - или Г-образную форму. Особенности формирования Г-затвора при наклонном напылении его металлизации показаны на рисунке 2.

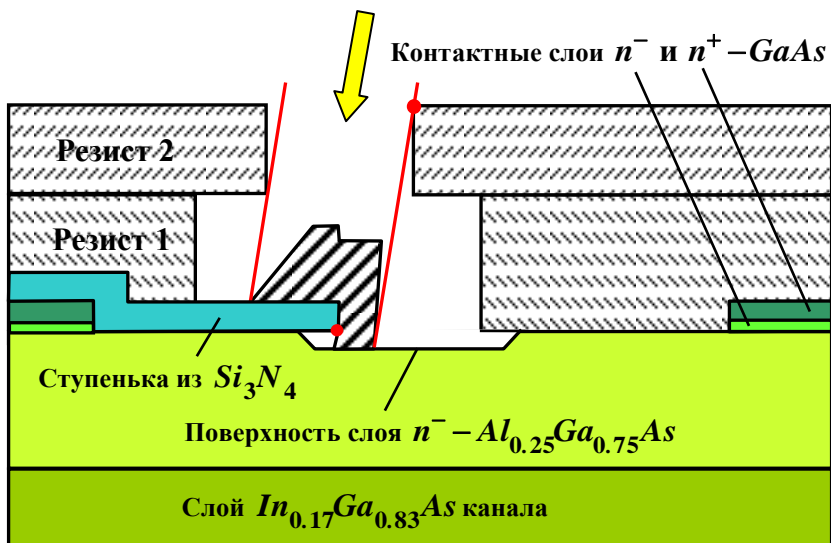


Рис. 2. Формирование затвора методом наклонного напыления его металлизации при применении планаризирующего слоя резиста 1.

На рисунке 2 желтая стрелка показывает направление потока металлов при формировании затвора. Красными точками выделены края слоев, ровность которых определяет ровность краев основания затвора.

В подразделе 1.4.1 проанализированы технологические особенности и проблемы, возникающие при формировании ставшего традиционным Т-образного затвора, широко используемого в мощных СВЧ транзисторах. Показано, что основные проблемы заключаются в следующем. При вскрытии в слое Si_3N_4 толщиной $0,1 \div 0,2$ мкм набора узких (с характерным минимальным продольным размером, который определяет длину основания затвора, не более $0,2$ мкм) окон при поперечном размере окон $50 \div 100$ мкм, необходимо избежать наличия остатков Si_3N_4 в нижней части вскрытого окна по всей его площади. Операция вскрытия окна в слое Si_3N_4 (как правило, это плазмо-химическая обработка (ПХО)) не должна вводить дефекты в нижележащий слой $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$, на котором формируется контакт Шоттки. В том случае, если избежать введения дефектов в слой $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$ не удастся, далее используется химическое травление, удаляющее дефектную часть слоя $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$, но такое решение не дает хорошую воспроизводимость толщины оставшейся части слоя $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$ и нежелательно в СВЧ МИС. Кроме этого, на операции

вскрытия окна в резисте (для формирования затвора методом взрывной литографии) необходимо обеспечить тщательную очистку окна от остатков резиста. Относительно большая толщина слоя Si_3N_4 при относительно малом продольном размере окна в этом слое создает проблемы и на этом этапе. Поскольку операция очистки проводится, как правило, в кислородной плазме, на этой операции тоже важно не только хорошо очистить окно от остатков резиста, но и на этой операции тоже избежать введения дефектов в нижележащий слой $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$.

В подразделе 1.4.2 приведено описание конструкции и технологического маршрута мощных многосекционных СВЧ транзисторов с Г-образным затвором, смещенным к истоку. Использование Г-образного затвора позволило обойти проблемы при формировании Т-затвора, связанные с малым продольным размером окна в слое нитрида кремния. Действительно, Г-образный затвор формируется не в узком окне, вскрытом в слое нитрида кремния, а с использованием либо края полуплоскости слоя нитрида кремния, либо существенно более широкого окна. Эта особенность Г-образного затвора сильно упрощает очистку поверхности слоя $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$, на которой формируется контакт Шоттки, от остатков слоя Si_3N_4 , причем без внесения дефектов в находящийся под ним слой $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$. Это преимущество наиболее сильно проявляется на краю полуплоскости слоя нитрида кремния – там практически полностью удаляются остатки Si_3N_4 и остатки резиста. За счет этого длина основания Г-образного затвора существенно лучше воспроизводится по величине в каждом поперечном сечении всех секций затвора.

В подразделе 1.4.3 приведены характеристики приборов на основе транзисторов с Г-образным затвором. Практика использования затвора Г-образной формы показала преимущество такого затвора и его технологии: выход годных МИС аттенюаторов и фазовращателей увеличился соответственно на 10,4 и 6,3% по сравнению с приборами на основе транзисторов, имеющих затвор дельта-образной формы. Установлено, что увеличение выхода транзисторов достигнуто за счет использования большего размера окна в маске двухслойного резиста, которое лучше вскрывается при проявлении, улучшенного удаления остатков резиста из окна, в том числе и на его краях. Дополнительное преимущество достигается также за счет формирования ровного края ступеньки из Si_3N_4 и большей точности формирования профиля углубления в подзатворном слое гетероструктуры. Показана возможность формирования затвора с длиной основания в диапазоне

0,1÷0,3 мкм с применением оборудования для оптической литографии, имеющего разрешение более 0,4 мкм.

В подразделе 1.4.4 детализированы конструктивно - технологические преимущества Г-образного затвора по сравнению с Т-образным затвором. Показано, что формирование Г-затвора принципиально не требует формирования узких окон в толстых слоях диэлектрика. По сравнению с Т-затвором, для формирования Г-затвора можно использовать ступеньку из существенно более толстого слоя Si_3N_4 , что дает возможность снижения продольного сопротивления каждой отдельной секции затвора. На нижнем краю даже толстой ступеньки из слоя Si_3N_4 методом плазмохимической обработки (ПХО) существенно проще полностью удалить остатки этого слоя вблизи поверхности подзатворного слоя $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$, на которой формируется контакт Шоттки (причем без введения дефектов в этот слой!) и обеспечить ровность истокового края основания затвора. Формирование в Г-затворе только истоковой части шляпки, формируемой на ступеньке из Si_3N_4 , позволяет использовать полезный эффект полевой обкладки – подавляется краевой эффект сильного увеличения плотности тока затвора вблизи истокового угла у основания Г-затвора при большом положительном потенциале на затворе. Это преимущество позволяет сохранить возможность использования всего рабочего диапазона изменения напряжения на затворе без недопустимо большого увеличения тока затвора. Относительное (по отношению к Т – затвору) увеличение продольного сопротивления одиночной секции Г – затвора, связанное с отсутствием стоковой части шляпки, устраняется за счет увеличения высоты ножки Г – затвора. Увеличение высоты ножки затвора оказывается возможным благодаря возможности увеличения толщины ступеньки Si_3N_4 без появления серьезных сопутствующих проблем.

В разделе 1.5 определена надежность разработанных транзисторов. Для определения надежности разработанных полевых транзисторов использовался «Расчетно-экспериментальный метод оценки показателей безотказности полевых транзисторов» вошедший в стандарт предприятия. Расчетно-экспериментальный метод (РЭМ) основывается на правилах обработки результатов испытаний изделий (разрабатываемого и группы конструктивно-технологических аналогов), установленных в ГОСТ 27.410 и РД 50-690. Исходными данными для оценки показателей безотказности конкретного типа транзистора являются результаты испытаний на этапах разработки и производства транзисторов (накопленной выборки), объединенных в

группу конструктивно-технологических аналогов (ГКТА). Поток отказов транзисторов в совокупной выборке характеризуется параметром « Λ », соответствующим экспоненциальному закону распределения наработок до отказа ($\Lambda = \lambda$). Результаты испытания всех транзисторов, наработки до отказа которых составляют массив данных для расчетов надежности. Для расчетов использованы соотношения из документа РД 50-690 (раздел 2 приложения 5, таблицы 46,47).

В подразделе 1.5.1 определены значения характеристических параметров транзисторов. Величина E_a (энергия активации процессов деградации полупроводниковой структуры и (или) параметров приборов) с учетом рекомендаций и результатов исследований, выполненных на предприятии, принята равной 0,8 эВ. Значение параметра n на основе этих данных выбрано равным минимальному значению: $n=1,1$. При таких величинах E_a и n , значение суммарной наработки в базовом режиме, полученное данным расчетно-экспериментальным методом, следует рассматривать как нижнюю границу возможной области значений t_{CVM} . В зависимости от конструктивных и электрических параметров анализируемых транзисторов, аппаратного и программного (аналитического) обеспечения, для определения температуры канала может быть использован экспериментальный или расчетный методы.

В подразделе 1.5.2 проведено применение базовых показателей $\lambda_{т.э}$ при расчете надежности радиоэлектронных изделий. Определение значения интенсивности отказов транзистора $\lambda_{т.э}$ конкретного типа (ТрКт), примененного в электрической схеме РЭИ, для использования в массиве значений $\lambda_{т.э}$ при расчете показателей надежности РЭИ по РДП 07262267.003 производят в следующем порядке: По КД, ТД и КРР РЭИ формируют базу исходных данных для расчета показателей сопоставимости применяемого транзистора с транзисторами ГКТА, для которой известны базовые значения ПВО. Определяют $T_{осн}$ транзистора в РЭИ при значениях температуры корпуса РЭИ, соответствующих нормальной, типовой и повышенной температурам окружающей среды при его эксплуатации. Температуру корпуса модуля определяют экспериментально. Температуру основания определяют экспериментально или расчетным путем. После этого рассчитывают значения $\lambda_{т.э}$ для транзистора ТрКт в рабочем режиме для указанных значений $T_{корп}$ ($T_{о.с}$). Рассчитанные значения $\lambda_{т.э}$ используют при расчете ПВО РЭИ взамен значений, определяемых

для полевых транзисторов по справочнику "Надежность ЭРИ" (22ЦНИИ МО).

В подразделе 1.5.3 приведены результаты анализа надежности. отказы в процессе испытаний рассматриваемой группы не были зафиксированы, то по данным испытаний для показателей надежности определяется только верхняя (для $\lambda_{т.э}$) и нижняя (для $T_{γб}$) доверительные границы при заданном уровне q (≤ 0.5) по формулам таблицы 47 РД 50-690. Получены следующие величины показателей надежности.

При $q = 0,5$; $\lambda_{т.б.н} = 0,648 \cdot 10^{-6}$ 1/ч; $T_{\gamma=95\%} \geq 79000$ ч.

При $q = 0,9$; $\lambda_{т.б.н} = 2,15 \cdot 10^{-6}$ 1/ч; $T_{\gamma=95\%} \geq 24000$ ч.

Для $T_{т.р} = 110$ °С и $J_{т.р} = 0,1$ А/мм получаем $K_{п.б.р} = 0,247$ и

$\lambda_{т.р} \leq 0,6 \cdot 10^{-6}$ 1/ч ($T_{\gamma=95\%} \geq 320$ тыс.ч) при доверительной вероятности $q = 0,5$;

$\lambda_{т.р} \leq 0,53 \cdot 10^{-6}$ 1/ч ($T_{\gamma=95\%} \geq 96$ тыс.ч) при доверительной вероятности $q=0,9$. Эти характеристики соответствуют мировому уровню показателей надежности для аналогичных полевых транзисторов.

Во второй главе приведены предпосылки создания и особенности конструкций мощных СВЧ полевых транзисторов с усиленной локализацией электронов в канале. Акцент делается на необходимости усиления локализации в слое канала электронов, сильно разогретых при продольном переносе по каналу под действием внешнего электрического поля. Действительно, для увеличения выходной мощности и коэффициента усиления, материал слоя канала специально выбирается таким, чтобы обеспечить максимально большую величину тока стока, достижимую при подаче положительного потенциала на затвор. Поэтому поперечный перенос горячих электронов из слоя канала приводит к уменьшению выходной мощности и коэффициента усиления транзисторов. В свою очередь, усиление локализации горячих электронов в слое канала приводит к увеличению максимального тока стока на участке насыщения выходных ВАХ (достижимого при подаче на затвор положительного потенциала), что и обеспечивает рост выходной СВЧ мощности и коэффициента усиления. Усиленная локализация горячих электронов в слое канала обеспечена в новом типе структур для мощных СВЧ полевых транзисторов с InGaAs каналом с помощью специальных локализирующих *pin*- потенциальных барьеров, встроенных в структуру, такие структуры получили название «DA-DrHEMT структуры».

Экспериментальные образцы DA-DpHEMT структур выращивались методом эпитаксии из молекулярных пучков в ИФП имени А.В. Ржанова СО РАН на установке Riber Compact-21T. Зонная диаграмма части DA-DpHEMT структуры, включающей в себя слой канала, спейсеры и локализующие барьеры вместе с контактом Шоттки, приведена на рисунке 3.

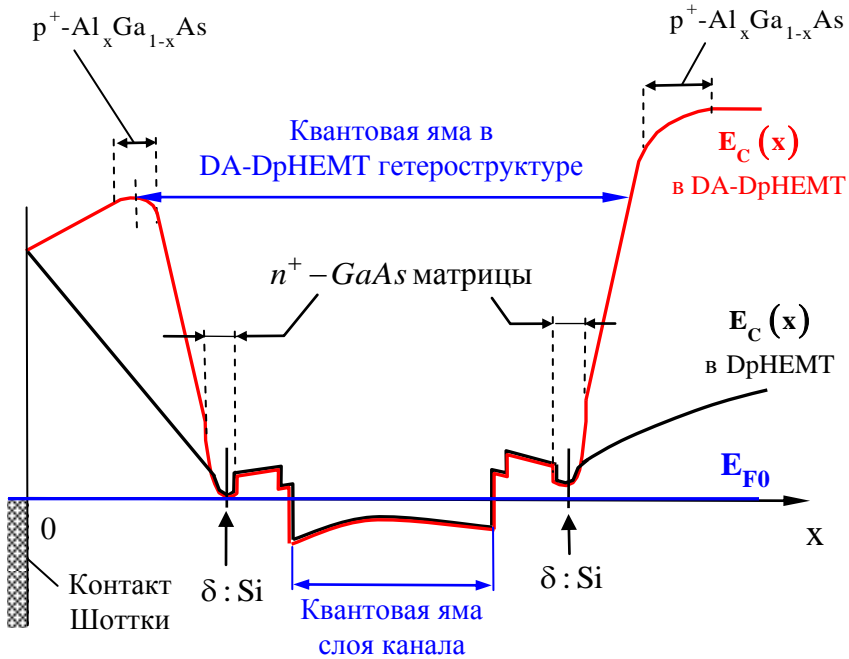


Рис. 3. $E_c(x)$ - зонная диаграмма в DA-DpHEMT структуре с контактом Шоттки в сравнении с $E_c(x)$ - зонной диаграммой DpHEMT структуры с контактом Шоттки. E_{F0} - положение уровня Ферми.

На рисунке 3 показаны зонные диаграммы для случая равенства поверхностных концентраций электронов в DA-DpHEMT и в DpHEMT структурах. Показано, что в этом случае зонные диаграммы практически одинаковы в областях слоя канала, сглаживающих слоев, спейсеров и матриц.

В разделе 2.1 приведены особенности нелокального разогрева электронов в полевых транзисторах на основе GaN. Полевые транзисторы с GaN каналом существенно превосходят по удельной

выходной СВЧ мощности транзисторы с InGaAs каналом, но отличаются сильной нелинейностью зависимости выходной СВЧ мощности от величины входной СВЧ мощности. С помощью расчетов, проведенных в гидродинамическом и температурном приближениях, показано, что максимальная частота усиления по току не только у транзисторов с InGaAs каналом, но и даже у транзисторов с GaAs каналом больше, чем в транзисторах с GaN каналом.

В разделе 2.2 приведены предпосылки разработки DA-pHEMT структур. Показано, что характерной особенностью работы мощного полевого транзистора является работа на участке насыщения выходных ВАХ, где основными являются сильнополевые эффекты: эффекты всплеска и насыщения дрейфовой скорости, вызванные сильным разогревом электронов в продольном внешнем электрическом поле. Использование DA-DpHEMT гетероструктур в составе транзисторов в принципе может дать следующие преимущества перед традиционными DpHEMT структурами с донорным дельта - легированием:

1. Уменьшение рассеяния горячих электронов в слоях, обрамляющих InGaAs канал за счет существенного уменьшения суммарной толщины слоев GaAs и AlGaAs, в которых могут находиться горячие электроны.
2. Увеличение поверхностной плотности электронов в квантовой яме структуры.
3. Уменьшение интенсивности рассеяния горячих электронов за счет возникновения сильного эффекта размерного квантования в квантовой яме структуры.
4. Уменьшение туннельного тока «затвор – квантовая яма структуры» при обратном смещении на затворе за счет возможности увеличения толщины потенциального барьера между металлизацией затвора и квантовой ямой структуры.
5. Уменьшение надбарьерного тока «квантовая яма структуры - затвор» при прямом смещении на затворе за счет существенного увеличения напряжения отпириания диодной *Sh-i-p-i-n* – структуры, сформированной между затвором и InGaAs каналом.
6. Уменьшение количества горячих электронов, имеющих возможность перехода в буферные слои структуры, сформированные на подложке и, как следствие, улучшение управления током стока при напряжениях на затворе, близких к напряжению запириания канала.

Какие из этих преимуществ окажут наиболее сильное влияние, зависит от назначения и конструкции транзистора. В частности, усиление локализации горячих электронов в слое InGaAs канала DA-DpHEMT структур, обеспечиваемое с помощью высоких локализующих *pin* - потенциальных барьеров и увеличенная плотность электронов в структуре, позволяют существенно увеличить максимально достижимые величины тока стока (даже без учета вклада всплеска дрейфовой скорости, на практике получена стационарная величина максимального удельного тока стока, равная 0,7 А/мм).

В разделе 2.3 проведен анализ физических механизмов, обеспечивающих улучшение выходных СВЧ характеристик DA-DpHEMT транзисторов.

В подразделе 2.3.1 приведены гидродинамическая и температурная модели для описания традиционных конструкций гетероструктур, описывающие нелокальный разогрев электронов. В этих моделях не учитывается эффект сильного размерного квантования, характерный для DA-DpHEMT структур.

В подразделе 2.3.2 приведена упрощенная и уточненная модели гетероструктуры с сильной локализацией электронов в слое канала. В упрощенной модели проведен учет размерного квантования в квантовой яме структуры, проявляющийся в виде выражения для концентрации электронов, входящего в уравнение Пуассона, но уравнение Шредингера не используется. Собственные энергии, входящие в выражение для концентрации электронов, вычисляются по известным для приближения треугольной потенциальной ямы выражениям. Более точная модель дополнена уравнением Шредингера, которое вместе с уравнением Пуассона и уравнениями для динамики изменения во времени дрейфовой скорости и кинетической энергии электронов позволяет более точно исследовать их нелокальный разогрев в прямой, обращенной и в двойной гетероструктурах различных типов.

В разделе 2.4 проведен теоретический анализ всплеска дрейфовой скорости в транзисторных структурах. В настоящее время технология молекулярно-пучковой эпитаксии предоставляет возможность выращивания огромного разнообразия гетероструктур. Возникает проблема, как из этого изобилия выбрать наиболее перспективные варианты структур для использования в составе конструкций транзисторов. Для решения этой проблемы хорошо подходит и использован теоретический анализ всплеска дрейфовой скорости, позволяющий выбрать лучшие варианты структур.

В подразделе 2.4.1 на основе экспериментальных результатов измерения выходной СВЧ мощности и коэффициента усиления проведена оценка дрейфовой скорости электронов в гетероструктурных полевых транзисторах с донорно - акцепторным легированием и перспективы их применения в миллиметровом диапазоне длин волн. Оценка показала, что существенное преимущество по СВЧ параметрам DA-DpHEMT транзисторов достигнуто за счет увеличенной амплитуды и ширины всплеска дрейфовой скорости электронов.

В подразделе 2.4.2 с помощью уточненной гидродинамической модели исследован всплеск дрейфовой скорости электронов в различных типах гетероструктур с донорно-акцепторным легированием. Введение в модель уравнения Шредингера позволило вычислять вероятности нахождения горячих электронов в различных слоях структур, объяснить причину увеличенной амплитуды и ширины всплеска дрейфовой скорости в DA-DpHEMT транзисторах, показавших рекордную величину удельной выходной СВЧ мощности в своем классе транзисторов. Анализ амплитуды, длительности и формы всплеска дрейфовой скорости показал, что по критерию «быстродействие и мощность» существенным потенциальным преимуществом может обладать двойная гетероструктура, имеющая $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ канал, окруженный широкозонными слоями из $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$, улучшенная с помощью локализирующих *pin* - барьеров. Преимущество таких структур выявлено даже по отношению к DA-DpHEMT структурам, транзисторы на основе которых показали на практике рекордные в своем классе характеристики по удельной выходной мощности.

В разделе 2.5 проведен анализ тепловых режимов полевых транзисторов с донорно-акцепторным легированием. Получение существенно увеличенной удельной выходной СВЧ мощности в DA-DpHEMT транзисторах приводит к необходимости дополнительного исследования проблемы возможного недопустимо сильного разогрева таких транзисторов в процессе работы.

В подразделе 2.5.1 проведена оценка расположения области нелокального тепловыделения в мощных полевых транзисторах, связанной с локализацией домена сильного поля у стокового края затвора. Показано, что если уменьшить вклад рассеяния электронов в широкозонном материале (например, создав локализирующие *pin* - потенциальные барьеры, как в DA-pHEMT структурах), то в открытом транзисторе можно добиться смещения статического домена от

затвора к стоку. Такому смещению домена сопутствует сильное (в разы) увеличение размера области тепловыделения и, как следствие, уменьшение перегрева транзистора при работе в режиме большого сигнала - до 20%, как и в гомоструктурных приборах.

В подразделе 2.5.2 приведены тепловые характеристики полевых транзисторов, параметры тепловой модели, которые привязаны к величине теплопроводности материалов, входящих в состав элементов конструкции транзисторов и их размерам. Расчет процесса теплопередачи проводился на основе трехмерного уравнения стационарной теплопроводности, учитывающей температурную зависимость коэффициента теплопроводности слоев гетероструктуры. Трехмерный характер используемого уравнения позволяет учесть и проследить влияние отдельных элементов конструкции транзистора на распределение температуры, что дает возможность нахождения условий максимально сильного отвода тепла и снижения максимальной температуры транзистора. Результаты вычислений для стандартных конструкций транзисторов показали следующее:

1. При периоде секций затворов 28 мкм, толщине подложки 100 мкм и при прочих равных условиях, максимальная температура в канале близка к максимальной температуре канала при периоде секций затворов 14 мкм и толщине подложки 25 мкм.

2. При одинаковой удельной выходной СВЧ мощности транзистора, максимальная температура в канале транзистора при длине секций, равной 50 мкм, существенно меньше, чем аналогичная температура канала транзистора с длиной секции 100 мкм. Различие этих температур возрастает при увеличении толщины подложки, уменьшении величины коэффициента теплопроводности гальванического золота и при увеличении температуры основания корпуса.

3. Даже при сравнительно большом периоде секций затворов в транзисторе, равном 28 мкм, при КПД транзистора, равном 50% и длине секции, равной 50 мкм, транзисторы при удельной выходной СВЧ мощности более 3 Вт/мм (потенциально достижимой в DA-DpHEMT транзисторах с InGaAs каналом), нагреваются до максимальных температур выше 150°С (что недопустимо для транзисторов с InGaAs каналом) даже при температуре основания корпуса 23°С. При длинах секций, равных 100 мкм, максимальный нагрев выше 150°С достигается при удельной выходной СВЧ мощности менее 2.5 Вт/мм.

4. При периоде секций затворов, равном 14 мкм при температуре основания корпуса 23° С, при двукратном увеличении удельной выходной СВЧ мощности (наблюдаемом в DA-DpHEMT транзисторах) при расчетах получен заметный нагрев транзисторов даже при длине секции 50 мкм, при коэффициенте теплопроводности гальванического золота равном 300 Вт/(м·К) и при толщине GaAs подложки 25 мкм. При длине секций 100 мкм, нагрев недопустимо велик - выше 150° С при температуре основания корпуса 23° С.

В подразделе 2.5.3 приведены результаты расчетов температуры в транзисторах с дополнительным тепловым интерфейсом, сформированным на верхней поверхности транзистора. Проведенные нами исследования позволяют выдвинуть принципиально иную идею – наряду с улучшением отвода тепла из областей его выделения только вниз, в направлении подложки, предлагается осуществить дополнительный отвод тепла вверх, отвести этот дополнительный поток тепла на периферию транзистора с последующим переносом этого потока тепла в основание корпуса через полупроводниковую подложку. Осуществить такой отвод тепла можно разными способами, например, нанести поверх очень тонкого защитного слоя Si_3N_4 тонкую диэлектрическую пленку алмазоподобного покрытия (АПП) по всей площади кристалла, сформировав в нем окна для электрических соединений шин истока, затвора и стока. Высокая теплопроводность АПП позволяет обеспечить его малое тепловое сопротивление. В результате расчетов распределения температуры установлено, что величина локальных максимумов температуры (высотой примерно 30° С), связанных с локальными областями тепловыделения, существенно уменьшается. Также получено, что при расширении площади АПП максимальная температура на поверхности транзистора существенно уменьшается. Результаты вычислений для транзисторов с тепловым интерфейсом в виде АПП на поверхности структуры показали следующее:

При толщине GaAs подложки 100 мкм и при периоде расположения секций затворов, равном 28 мкм, АПП - тепловой интерфейс толщиной более 5 мкм с удельной теплопроводностью 1000 Вт/мК обеспечивает следующие возможности в жестких условиях работы (непрерывный режим при температуре окружающей среды, равной 80° С):

1. Эффективный отвод тепла в транзисторах с длиной секций 50 мкм при $W \leq 3.5$ Вт/мм.

2. В транзисторах с длиной секций 100 мкм обеспечивается эффективный отвод тепла при $W \leq 2.5$ Вт/мм.

При толщине GaAs подложки 25 мкм и при периоде расположения секций затворов, равном 14 мкм, АПП - тепловой интерфейс толщиной более 5 мкм с теплопроводностью 1000 Вт/(мК) в жестких условиях работы (непрерывный режим при температуре окружающей среды, равной 80°С) полностью решает проблему теплоотвода в таких вариантах транзисторов:

1. В транзисторах с длиной секций 50 мкм - при $W \leq 2.0$ Вт/мм.

2. В транзисторах с длиной секций 100 мкм - при $W \leq 1.5$ Вт/мм.

Уменьшение длины секций (также как и в результатах расчётов для транзисторов без АПП интерфейса), сильно уменьшает величину перегрева транзистора.

В третьей главе приведено описание особенностей конструкции и технологии изготовления DA-pHEMT и DA-DpHEMT транзисторов и результаты измерений характеристик DA-DpHEMT транзисторов.

В разделе 3.1 подробно описаны особенности конструкции и технологий DA-pHEMT и DA-DpHEMT транзисторов по следующим направлениям:

- омические контакты истока и стока
- особенности формирования транзисторных мезаструктур или канавок для омических контактов
- удаление гетероструктурных слоев для омических контактов
- удаление собственного окисла
- уменьшение толщины подложки в транзисторах на основе DA-DpHEMT структур
- соотношения величин размеров Г- затвора

В разделе 3.2 проведено сравнение технологий DA-DpHEMT и DpHEMT транзисторов. Из описания особенностей технологии DA-DpHEMT транзисторов следует, что эти особенности полностью используются и в традиционной технологии DpHEMT транзисторов. Показано, что необходимость обеспечения в DA-DpHEMT транзисторах омического контакта непосредственно к слою InGaAs канала не приводит к усложнению технологии, связанному с формированием мезы для размещения транзистора или специальной канавки для омического контакта. Естественно, боковая стенка мезы может быть использована для размещения омических контактов истока и стока непосредственно к слою InGaAs канала. Основные

особенности конструкции DA-DpHEMT транзистора в таком исполнении показаны на рисунке 4.

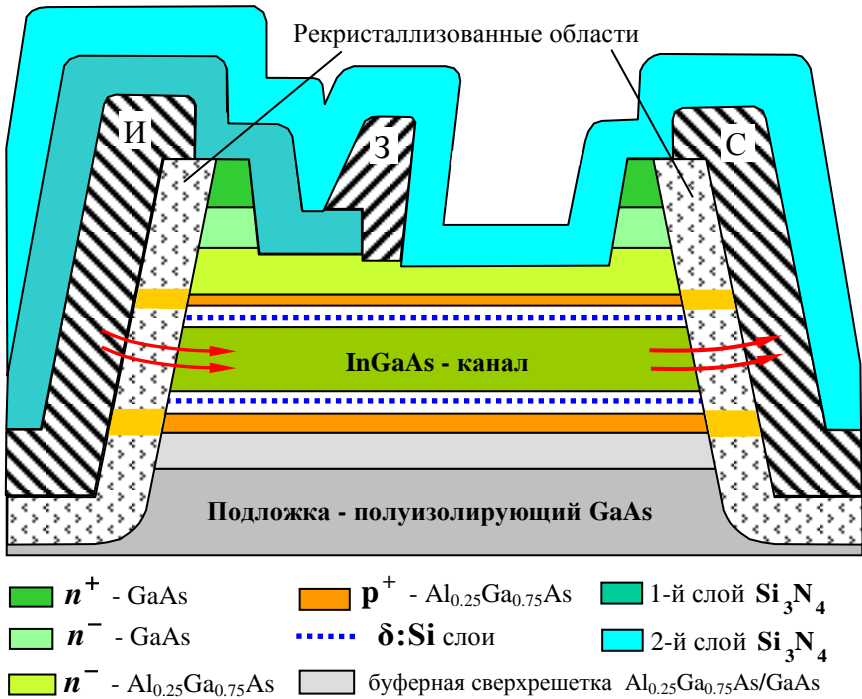


Рис. 4. Поперечное сечение DA-DpHEMT транзистора в меза – исполнении с Γ -затвором.

На рисунке 4 красными стрелками показаны потоки электронов из шины истока в канал и из канала в шину стока, обходящие потенциальные барьеры, формируемые акцепторами в рекристаллизованных областях омических контактов. Конструкция транзистора в меза – исполнении позволяет сформировать омический контакт непосредственно к слою канала, обеспечив при этом малое переходное сопротивление омических контактов истока и стока.

В разделе 3.3 приведено описание первых экспериментальных образцов DA-DpHEMT гетероструктур и DA-DpHEMT транзисторов и результаты измерений их характеристик - как статических, так и СВЧ параметров транзисторов. В соответствии с измерениями эффекта Холла, использованные в составе транзисторов DA-DpHEMT структуры при $T = 300\text{ K}$ продемонстрировали холловскую

подвижность электронов $\mu = 5300 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, поверхностную плотность $n_s = 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при доле содержания индия в слое канала, равной 0,165. На основе DA-DpHEMT структур с этими характеристиками были изготовлены мощные полевые транзисторы с затвором, имеющим длину основания 0,4 – 0,5 мкм при общей (по всем секциям) ширине затвора, равной 0,8 мм.

Транзисторы из двух партий в непрерывном режиме работы показали на частоте 10 ГГц удельную выходную СВЧ мощность более 1,3-1,4 Вт/мм, коэффициент усиления - более 8 - 9 дБ, КПД - около 50%. Транзисторы из третьей партии в непрерывном режиме работы показали на частоте 10 ГГц удельную выходную СВЧ мощность более 1,6 Вт/мм, коэффициент усиления - более 9 дБ, КПД - около 50%. При импульсном режиме работы результаты заметно улучшились, транзисторы из третьей партии показали на частоте 10 ГГц удельную выходную СВЧ мощность более 1,8 Вт/мм, коэффициент усиления - более 9 дБ, КПД - более 50%.

Следует отметить, что полученные результаты существенно превосходят мировой уровень, достигнутый DpHEMT транзисторами аналогичного типа.

В разделе 3.4 приведен анализ результатов экспериментальных исследований DA-DpHEMT транзисторов. Выявлены следующие два наиболее вероятных механизма, объясняющие существенное превосходство DA-DpHEMT транзисторов по выходной СВЧ мощности и по коэффициенту усиления на СВЧ.

Первый механизм. В DA-DpHEMT улучшение характеристик достигается за счет существенного увеличения амплитуды и ширины всплеска дрейфовой скорости, приводящего к существенному увеличению нестационарной величины максимального тока стока.

Второй механизм. Улучшение характеристик достигается за счет существенного роста поверхностной плотности электронов в канале, без существенного падения подвижности. В принципе в традиционной структуре тоже можно увеличивать поверхностную плотность электронов, но в ней при этом гораздо большая часть электронов оказывается в широкозонном материале.

Показано, что DA-DpHEMT транзисторы имеют хорошие перспективы использования в СВЧ диапазонах на высоких частотах, в транзисторах с повышенной линейностью зависимости выходной СВЧ мощности от входной СВЧ мощности. Принцип усиления локализации горячих электронов в слое канала может быть с успехом применен и в GaN – транзисторах.

В разделе 3.5 приведено описание экспериментальных образцов DA-DpHEMT транзисторов с оптимальной рабочей точкой при нулевом напряжении на затворе. Такие транзисторы могут быть полезны для некоторых видов АФАР. Принцип сдвига рабочей точки в нулевое напряжение на затворе основан на специфической реакции Sh-i-r-i-n - потенциального барьера, определяющего вид потенциального барьера контакта Шоттки, на подачу прямого смещения на затвор – наблюдается увеличение напряжения отпираания контакта Шоттки до величин, равных $1,2 \div 1,6$ вольт. Для получения нужного эффекта достаточно увеличить толщину слоя (в нашем случае это слой $Al_{0,25}Ga_{0,75}As$), на котором формируется контакт Шоттки. Экспериментальные образцы транзисторов этого типа имели ширину затвора 0,8 мм при длине основания Г-образного затвора около 0,3 мкм и пробивное напряжение $25 \div 28$ В. Измерения СВЧ параметров проводились в импульсном режиме на частоте 10 ГГц. Получено, что при выборе рабочей точки при нулевом, и даже при положительном напряжении на затворе, удельная выходная СВЧ мощность достигает величин, превышающих 1,6 Вт/мм, коэффициент усиления - более 10 дБ, КПД - около 50%.

Важно отметить полезную особенность таких транзисторов: с ростом входной СВЧ мощности их выходная СВЧ мощность растет практически линейно в широком диапазоне изменения входной СВЧ мощности ($0 \div 70$ мВт), затем быстро начинается резкое насыщение величины выходной мощности (разница мощности при 1 дБ и 3 дБ компрессии мала). Эта особенность поведения отличает их в лучшую сторону от традиционных DpHEMT транзисторов.

В разделе 3.6 приведено описание особенностей конструкции омических контактов в DA-pHEMT и DA-DpHEMT транзисторах. Описана причина образования (из-за наличия верхнего акцепторного слоя) и область расположения потенциального барьера в рекристаллизованном слое омического контакта. Показано, как формирование омического контакта на краю специально сформированного углубления или на краю мезы, позволяет осуществить омический контакт непосредственно к слою канала, избежав тем самым отрицательного влияния потенциального барьера в рекристаллизованном слое.

В разделе 3.7 приведено описание разработки усилителей мощности на транзисторах с донорно-акцепторным легированием. Все приведенные выше результаты измерений СВЧ параметров проводились с помощью измерительной установки, в которой

согласующие трансформаторы обеспечивали хорошее согласование только в одной задаваемой точке частотного диапазона (10 ГГц). Для оценки эффективности применения DA-DpHEMT транзисторов в промышленных вариантах конструкций усилителей СВЧ мощности, были проведены измерения параметров транзисторов в используемых на практике согласующих схемах.

В подразделе 3.7.1 проведено сравнение выходных характеристик усилительных каскадов на основе DA-DpHEMT и DpHEMT транзисторов с одинаковой топологией и длиной затвора.

Для схемы «тип 1» получено, что выходная СВЧ мощность и коэффициент усиления в тестовой схеме с DA-DpHEMT транзистором более чем в 1,5 раза превосходит аналогичные параметры для тестовой схемы с DpHEMT транзистором, а КПД данных схем практически одинаков. Следует отметить, что DA-DpHEMT наиболее эффективно, т.е. когда наблюдается максимум выходной СВЧ мощности, работают при напряжении на стоке более 9 В, в то время как у DpHEMT ухудшаются выходные характеристики при увеличении напряжения на стоке более 8 В. Для демонстрации максимальных возможностей транзисторов, измерения СВЧ параметров DA-DpHEMT транзисторов проводились при напряжении на стоке 9 В, а измерения СВЧ параметров DpHEMT – при напряжении на стоке 8 В.

Для схемы «тип 2» приведены частотные зависимости выходных характеристик с DA-DpHEMT в сравнении с DpHEMT, измеренные при входной СВЧ мощности $P_{вх}=500$ мВт. Оба типа транзисторов в схеме «тип 2» имеют более высокие выходные характеристики. Так в полосе частот 7,5-8,5 ГГц тестовая схема на основе DA-DpHEMT имеет выходную мощность более 6 Вт при коэффициенте усиления более 10,5 дБ и КПД около 45 %, а в полосе частот 7-9 ГГц – более 5 Вт при коэффициенте усиления более 10 дБ, и КПД более 30 %.

Показано, что в полосе частот 7,5-8,5 ГГц транзистор в DA-DpHEMT исполнении с общей шириной затвора 4,8 мм имеет удельную выходную мощность равную 1,25 Вт/мм, а в существенно более широкой полосе частот 7-9 ГГц – больше 1 Вт/мм.

При этом DpHEMT транзистор с таким же затвором и в той же схеме имеет удельную выходную мощность, равную всего лишь 0,7 Вт/мм в полосе частот 9-9,5 ГГц.

Полученные характеристики усилительного каскада на DA-DpHEMT находятся на уровне лучших мировых достижений в области разработки мощных транзисторов на AlGaAs-InGaAs-GaAs

гетероструктурах (возможно, и превосходят мировой уровень, т.к. получены при большом значении общей ширины затвора – 4,8 мм, и в достаточно широком диапазоне частот).

DA-DpHEMT транзистор в тестовой схеме «тип 2», как и в тестовой схеме «тип 1», демонстрирует выходную мощность и коэффициент усиления, более чем в 1,5 раза превосходящие аналогичные характеристики в аналогичных тестовых схемах с транзисторами в DpHEMT исполнении.

В подразделе 3.7.2 проведено сравнение выходных характеристик усилительных каскадов на основе DA-DpHEMT и DpHEMT транзисторов, изготовленных по разным технологиям. Для сравнения были выбраны DA-DpHEMT и DpHEMT транзисторы, имеющие следующие основные геометрические размеры:

1. DA-DpHEMT транзистор с длиной основания затвора 0,3 мкм при ширине затвора 4800 мкм. Размер кристалла 600x1950 мкм, толщина полупроводниковой подложки 100 мкм, расстояние между затворами 28 мкм;

2. DpHEMT транзистор с длиной основания затвора 0,25 мкм при ширине затвора 6720 мкм. Размер кристалла 580x1830 мкм, толщина полупроводниковой подложки 30 мкм, расстояние между затворами 14 мкм.

Из сравнения результатов измерений видно следующее.

- Для DA-DpHEMT транзистора при входной мощности 500 мВт, напряжении на стоке 9 В,

- для DpHEMT транзистора при входной мощности 700 мВт и напряжении на стоке 8В:

выходная СВЧ мощность и КПД в тестовых схемах «тип 2» практически равны и составляют около 6 Вт и 40% соответственно. При этом коэффициент усиления тестовой схемы с DA-DpHEMT транзистором более чем в 1,5 раза превышает аналогичный для схемы с DpHEMT транзистором.

Таким образом, транзистор DA-DpHEMT в сравнении с транзистором DpHEMT показывает практически равные значения выходной мощности и КПД в значительно более широкой полосе частот, хотя DA-DpHEMT имеет общую ширину затвора в 1,4 раза меньше, чем DpHEMT.

При входной мощности 600 мВт и напряжении на стоке 9,5 В в импульсном режиме на частоте 9,2 ГГц выходная мощность

усилительного каскада на DA-DpHEMT транзисторе с шириной затвора 4,8 мкм, составила более 6 Вт.

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

В заключении сформулированы основные полученные результаты:

Разработаны оригинальная конструкция и технология изготовления мощного полевого транзистора, позволяющие использовать наклонное напыление металлов для обеспечения точного положения затворов между истоками и стоками, с возможностью самосовмещения и задаваемого смещения затворов к истоку транзистора, существенно повысившие выход годных приборов.

Разработаны оригинальная конструкция, способ формирования и технологии изготовления Г – образного затвора, позволяющие формировать затвор транзистора с длиной в 2 – 3 раза меньше, чем разрешение используемого литографического оборудования без увеличения сопротивления затвора, улучшающие характеристики транзисторов и увеличивающие выход годных изделий.

Предложена концепция и разработаны конструкции DA-DpHEMT гетероструктур, с дополнительными донорно - акцепторными локализирующими потенциальными барьерами, имеющими за счет подавления поперечного пространственного переноса носителей заряда среднюю дрейфовую скорость электронов под затвором транзисторов на их основе в полтора раза превышающую дрейфовую скорость электронов под затвором транзисторов на основе традиционных DpHEMT гетероструктур при сравнимой и большей поверхностной плотности электронов.

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

Предложены и разработаны мощные полевые транзисторы на гетероструктурах с донорно – акцепторным легированием имеющие в 1.5 – 2 раза большие коэффициент усиления и удельную выходную мощность по сравнению с транзисторами на традиционных DpHEMT – структурах.

Публикации по теме диссертации

Монографии

1. 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.
2. 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 ЖТФ, 2018, том 44, вып. 17 С.103 -110.
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 ЖТФ, 2017, том 43, вып. 12 с.42 – 51
4. 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 pHEMT транзисторах” Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 16 с.41 – 47.
5. 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 ЖТФ, 2015, т.41, вып. 3 с.81 – 87.
6. 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”// ФТП, 2014, том 48, В.5, стр. 684-692.

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 ЖТФ, 2012, т.38., в. 17, стр. 84-89.
8. Борисов В.И., Лапин В.Г., Сизов В.Е., Темирязов А.Г. “Транзисторные структуры с управляемым потенциальным рельефом одномерного квантового канала”// Письма в ЖТФ, 2011 т.37, в.3. с.85-92.
9. Борисов В.И., Лапин В.Г., Темирязов А.Г. Ф.И.Торопов, А.И.Чмиль “Особенности квантования конденсата одномерных каналов, полученных методом травления”// Радиотехника и электроника, 2009 т.54, №4. с.488-492.
10. С.И. Радауцан, Г.Л. Ляху, А.П. Снигур, В.А. Чумак, В.Г. Лапин, А.М. Маринова, К.Г. Ноздрин “Полевые транзисторы с барьером Шоттки на гетероструктурах InGaAs/InP”// Письма в ЖТФ, 1989 т.15, в.18. с.30-34.

Публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК.

11. В.Г. Лапин “Возможности и перспективы использования Г-образного затвора для изготовления полевых транзисторов СВЧ” // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2018, В.2(537), С. 52-61.
12. 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, В.1(536), С. 25-31.
13. 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, В.1(536), С. 6- 20.
14. И.В. Куликова, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, Н.К. Приступчик “Исследование тепловых режимов мощных полевых транзисторов с донорно-акцепторным легированием” // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2017, В.3(534), С. 6- 21.

15. В.Г Лапин “Перспективы развития и применения DA-pHEMT в СВЧ МИС” // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2017, В.1(532), С. 26- 44.
16. 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, В.1(528), С. 65- 69.
17. 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, В.4(523), С. 5- 16.
18. В.М.Лукашин, А.Б.Пашковский, В.Г Лапин, С.В. Щербаков, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, А.А. Капралова “Мощные гетероструктурные полевые транзисторы с донорно-акцепторным легированием, работающие при нулевом смещении на затворе”// Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2014, В.1(522), С. 5 - 14.
19. К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, А.Б. Соколов, А.И. Торопов “Серийный pHEMT с удельной мощностью 1,4 Вт/мм” //Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2012, В.1(512), С. 55- 61.
20. 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. No 11, с. 90-93.
21. В.Г Лапин. В.М. Лукашин, К.И. Петров, А.М. Темнов. “Полевые транзисторы со смещенным затвором” // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2011, В.4(511), С. 59- 71.
22. А.М. Темнов, К.В. Дудинов, Ю.М. Богданов, А.В. Крутов, В.А. Красник, В.Г. Лапин, С.В. Щербаков. “Комплект унифицированных МИС СВЧ для многоканальных приемопередающих модулей АФАР X – диапазона”//. Электронная. Техника. Сер.1. СВЧ - Техника, 2009, В.2(501). С. 31-44.
23. Ю. М. Богданов, В. А. Красник, В. Г. Лапин, В. А. Лукьянов, А. М. Темное, К. И. Петров, И. В. Самсонова “Ряды устройств для преобразования частоты на основе многофункциональной GaAs МИС” //Электронная. Техника. Сер.1. СВЧ - Техника, 2007, В.1(489). С. 50-77
24. Ю. М. Богданов, В. Г. Лапин, А. М. Темнов, Ф. Е. Щербаков “Монолитный двух-позиционный переключатель для диапазона

- частот 0,5...18ГГц, согласованный по всем каналам. ”// Электронная Техника. Сер.1. СВЧ - Техника, 2007, В.1(489). С. 33-37.
25. Д. В. Бабинцев, А. Н. Королёв, В. А. Красник, А. В. Климова, В. Г. Лапин, В. М. Малыщик, Л. В. Манченко, В. А. Пчелин, В. Б. Трегубое, В. Ю. Язан. “Транзисторный импульсный усилитель с выходной мощностью 9...11 Вт в диапазоне частот 15,9...16,4 ГГц”// Электронная Техника. Сер.1. СВЧ - Техника, 2007, В.1(489). С. 25-32.
 26. Д.В. Бабинцев, А. Н. Королев, А. В. Климова, В.А. Красник, В.Г. Лапин, В. М. Малыщик, Л. В. Манченко, В. А. Пчелин, В. Б. Трегубов, В.Ю. Язан “Мощный твердотельный импульсный усилитель двухсантиметрового диапазона” // Радиотехника №3, 2007г. Стр.41-42.
 27. Н.В. Абакумова, Ф.Е. Щербаков, О.С. Зуева, Ю.М. Богданов, В.Г. Лапин, А.М. Темнов “Двухканальный переключатель на ПТШ” // Электронная Техника. Сер.1. СВЧ - Техника, 2006, В.1(487). С. 31-36.
 28. К. Г. Ноздрина, К. В. Дудинов, В. Ф. Лапин, А. В. Галанихин, К. П. Петров “Использование диффузионного барьера при формировании омических контактов полевых транзисторов на арсениде галлия” // Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1991, В. 2(436). С. 45-47.
 29. Б. В. Маркин, О. С. Трифонова, В. В. Чикун, В. Г. Лапин, М. Г. Пономарева “Влияние химических обработок на характеристики барьеров Шотки в полевых транзисторах” // Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1990, В.10(434). С. 42-44.
 30. А.А. Кальфа, В.Н. Кобзаренко, М.Б. Коханюк, В.Г. Лапин, М.В. Павловский, А.Б. Пашковский, К.Г. Ноздрина, Е.В. Руссу “Исследование полевых транзисторов на фосфиде индия” // Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1989, В.9(423). С. 21-24.
 31. С. В. Кармазин, В. Г. Лапин “Физическая модель определения сопротивлений истока и стока в полевых транзисторах с затвором Шотки. Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1988, В.8(412). С. 24-27.
 32. Н. Б. Горев, В. Г. Лапин, Т. В. Макарова, Е. Ф. Прохоров, А. Т. Уколов “Фоточувствительность арсенидгаллиевых полевых транзисторов в сильных электрических полях” // Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1987, В.8(402). С. 24-27.
 33. В. Г. Лапин, Т. В. Макарова, Е. Ф. Прохоров, А. Т. Уколов “Эффекты сильного поля и дрейф параметров полевых транзисторов из n-GaAs с барьером Шотки”// Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1986, В.4(388). С. 24-27.

Патенты и свидетельства

1. Патент РФ №2298255 по заявке № 2005125698. Приоритет от 12.08.2005. Мощная гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона. Иовдальский В.А., Пчелин В.А., В.Г.Лапин, Моргунов В.Г.
2. Патент РФ №2307424 по заявке № 2005137680/28. Приоритет от 02.12.2005. Мощный СВЧ полевой транзистор с барьером Шотки. В.Г.Лапин, К.И.Петров, А.М.Темнов.
3. Заявка № 2008100928. Приоритет от 09.01.2008. Положительное решение от 20.01.2009. Способ изготовления СВЧ полевого транзистора с барьером Шотки. В.Г.Лапин, К.И.Петров, А.М.Темнов.
4. Патент РФ №2390877 по заявке № 2009113208. Приоритет от 08.04.2009. Гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона. Иовдальский В.А., В.Г.Лапин, Земляков В.Е. Виноградов В.Г., Лисицин А.А.
5. Патент РФ №2393589 по заявке № 2009119693. Приоритет от 25.05.2009. Мощный СВЧ полевой транзистор с барьером Шотки. В.Г.Лапин, К.И.Петров, А.М.Темнов.
6. Патент РФ на полезную модель №8069 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.
7. Патент РФ на полезную модель №111351 по заявке № 2011136159. Приоритет от 31.08.2011. Зарегистрирована: 10.12.2011 Полевой транзистор с увеличенным напряжением пробоя // Е.И.Голант, К.С.Журавлев, В.Г.Лапин, В.М.Лукашин, А.Б.Пашковский.
8. Патент РФ №2419176 по заявке № 2010109569. Приоритет от 15.03.2010. Зарегистрирована: 20.05.2011 Способ изготовления диэлектрической пленки для полупроводниковых структур электронной техники. Галанихин А.В. Галанихин П.А. В.Г.Лапин, К.И.Петров
9. Патент РФ №2436183 по заявке № 2010134084. Приоритет от 13.08.2010. Зарегистрирована: 10.12.2011 Способ металлизации элементов изделий электронной техники. В.Г.Лапин, К.И.Петров.
10. Патент РФ №2449419 по заявке № 2010154371. Приоритет от 29.12.2010. Зарегистрирована: 27.04.2012 Гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона // Иовдальский В.А. Виноградов В.Г., В.Г.Лапин, Манченко Л.В., Земляков В.Е.

11. Патент РФ №2465682 по заявке № 2011126863. Приоритет от 29.06.2011. Зарегистрирована: 27.10.2012 Способ изготовления СВЧ полевого транзистора с барьером Шотки // В.Г.Лапин, Петров К.И., Кувшинова Н.А.
12. Патент РФ №2463685 по заявке № 2011123071. Приоритет от 07.06.2011. Зарегистрирована: 10.10.2012 Мощный полевой транзистор СВЧ // А.А. Воробьев, А.В. Галдецкий, В.Г. Лапин,
13. 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.
14. Патент РФ на изобретение №2563545 по заявке № 2014126332. 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.
15. 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.

Другие публикации по теме диссертации.

1. V.G. Lapin, A.M. Temnov, K.I. Petrov, V.A. Krasnik GaAs Microwave Offset Gate Self-Aligned MESFET's and their applications. "GaAs 2000 Conference proceedings, 2nd-3rd October 2000" p.314-317.
2. Дудинов К.В., Лапин В.Г., Темнов А.М, Аверин В.В. Применение эпитаксиальных алмазных подложек для создания полупроводниковых СВЧ – приборов Десятая Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Сборник материалов конференции 11-15 сентября 2000 г., Севастополь, Крым, Украина, стр. 10-13.
3. Лапин В.Г., Красник В.А., Петров К.И., Темнов А.М Мощные GaAs полевые СВЧ транзисторы со смещенным затвором Одиннадцатая Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Сборник материалов конференции 10-14 сентября 2001 г., Севастополь, Крым, Украина, стр. 135-136.
4. Иовдальский В.А., Лапин В.Г., Пчелин В.А, Составной двухъярусный транзистор для усилителей мощности СВЧ диапазона Девятнадцатая Международная конференция «СВЧ-техника и

- телекоммуникационные технологии». Сборник материалов конференции 14-18 сентября 2009 г., Севастополь, Крым, Украина, стр. 74-75.
5. 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.
 6. В.М.Лукашин, А.Б.Пашковский, К.С.Журавлев, А.И.Торопов, В.Г.Лапин “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. с. 78-79, 2012.
 7. 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. с. 122-123, 2013.
 8. 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. с. 122-123, 2013.
 9. 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.
 10. А.А. Борисов, С.В. Щербаков, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, В.Г. Лапин, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, Перспективы развития полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием во ФГУП НПП «ИСТОК». Пульсар – 20013 "Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА" Материалы конференции. с. 45 – 48, 24 – 25 октября 2013.
 11. 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.

12. 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.
13. 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.
14. 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” 24-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2014). Севастополь, 7—13 сентября 2014г. Материалы конференции. С. 79-80, 2014.
15. 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.
16. 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.
17. 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 ДА-рНЕМТ” 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.
- 18.Новиков С.И., Пашковский А.Б., Лапин В.Г., Лукашин В.М. "Исследование уровней размерного квантования в обращённых гетероструктур 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.
 - 19.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 конференции С. 70 – 74.
 - 20.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 конференции С.65 – 69.
 - 21.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 внутрисогласованный транзистор Х – 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.
 - 22.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 Х-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.
 - 23.Пашковский А.Б., Куликова И.В., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Приступчик Н.К. “Перспективы использования теплопроводящих покрытий в мощных арсенидгаллиевых 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.
24. 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.
25. А.А. Маковецкая, В.А. Пчелин, В.Г. Лапин, А.Б. Пашковский, В.М. Лукашин, С.В. Щербаков, К.С. Журавлев, А.И. Торопов “Мощный усилительный каскад X-диапазона с удельной выходной мощностью более 1 Вт/мм на основе DA-DpHEMT” // Материалы XIX координационного научно-технического семинара по СВЧ технике. 2017. Нижний Новгород, С.71-73.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. 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.