

Экз. №

На правах рукописи

ЛУКАШИН Владимир Михайлович

УДК.621.385.6

**УВЕЛИЧЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ
И КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ДРНЕМТ – ТРАНЗИСТОРОВ
ЗА СЧЕТ ПОВЫШЕНИЯ СТЕПЕНИ ЛОКАЛИЗАЦИИ
ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНОВ В КАНАЛЕ**

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

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

г. Фрязино 2015 г.

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Пашковский Андрей Борисович.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
ОАО «НПП «Пульсар» Гарбер Геннадий Зеликович

кандидат физико-математических наук, Фрязинский филиал Институ-
та радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
заведующий лабораторией Борисов Виталий Иванович.

Ведущая организация Институт СВЧ полупроводниковой электрони-
ки РАН (ИСВЧПЭ) г. Москва.

Защита состоится 26 мая 2015 г. в 11 часов на заседании диссертаци-
онного совета Д409.001.01 при АО «НПП «Исток» им. Шокина»
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 www.istokmw.ru

Автореферат разослан 24 марта 2015 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

кандидат физико-математических наук



Погорелова Э.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Твердотельная сверхвысокочастотная (СВЧ) электронная компонентная база (ЭКБ), одним из важнейших элементов которой остаются усилители мощности на полевых транзисторах, активно востребована для разработки огромного числа различных радиоэлектронных систем. Полевые транзисторы с барьером Шоттки (ПТШ) на арсениде галлия, других соединениях A_3B_5 и различных гетероструктурах на их основе, остаются основными активными элементами ЭКБ для диапазона частот от единиц до сотен ГГц.

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 широкозонных гетероструктурах. В России, несмотря на отдельные удачные лабораторные разработки, создание промышленной технологии приборов на широкозонных гетероструктурах еще далеко от завершения. Требования экономической независимости и национальной безопасности России приводят к необходимости создания отечественной СВЧ ЭКБ, сравнимой по параметрам с серийными мировыми аналогами, но с учетом возможностей уже имеющихся технологий и оборудования. Представленная работа базируется на уже внедренной серийной технологии DrНЕМТ (рНЕМТ с двухсторонним наполнением канала электронами), что обеспечивает ее актуальность.

Считается, что любая оптимизация гетероструктур для серийных рНЕМТ транзисторов не позволяет получать удельную выходную СВЧ мощность заметно больше 1 Вт/мм на частоте 10 ГГц, но в данной работе на практике продемонстрировано существенное увеличение выходной СВЧ мощности транзистора и коэффициента усиления.

Существенное увеличение выходной СВЧ мощности и коэффициента усиления транзистора обеспечивается увеличени-

ем максимального (при положительном потенциале затвора) тока стока в условиях сильного разогрева электронов. Причиной этого полезного эффекта является повышение проводимости канала за счет ограничения поперечного пространственного переноса электронов с помощью встроенных потенциальных барьеров. Эти потенциальные барьеры формируются зарядами доноров и акцепторов в AlGaAs-слоях, имеющими $p-i-n$ профиль легирования, и выполняют локализирующую функцию – заметно подавляют уход горячих электронов из InGaAs – канала в широкозонные слои AlGaAs. Предлагаемое техническое решение выполнено в рамках эпитаксиальной технологии, используемой в уже освоенной серийной технологии AlGaAs-InGaAs-GaAs – DpHEMT, что дополнительно усиливает актуальность темы.

Цель работы – разработка нового типа транзисторов в исполнении «DpHEMT» с улучшенными выходными характеристиками на основе гетероструктур с селективным донорно-акцепторным легированием ((DA)-DpHEMT структуры и транзисторы на их основе), за счет подавления поперечного пространственного переноса электронов локализирующими потенциальными барьерами.

Постановка задачи - для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Исследовались особенности нелокального разогрева электронов в полевых транзисторах на основе GaN и GaAs;

- Разрабатывалась (DA)-DpHEMT гетероструктура с локализирующими потенциальными барьерами, подавляющими поперечный пространственный перенос электронов из InGaAs – канала.

- Разрабатывалась (DA)-DpHEMT гетероструктура с делителем напряжения на затворе, образованным $i-p-i-(\delta:Si)$ слоями в барьере Шоттки транзистора, обеспечивающим оптимум положения рабочей точки транзистора при напряжении затвора, равном нулю.

- Разрабатывался метод формирования омических контактов в заглаблениях с удаленными акцепторными слоями, позво-

ляющий существенно уменьшить сопротивление омических контактов в (DA)-DrHEMT транзисторах.

Объектом исследования служат – мощные полевые СВЧ транзисторы с большой шириной затвора.

Предметом исследования служат – структуры полевых транзисторов, методики формирования локализирующих барьеров и омических контактов.

Научная новизна. В диссертации впервые получены следующие результаты:

1. Показано, что поперечный пространственный перенос и сильные зависимости времен релаксации от энергии приводят к тому, что результаты расчетов по гидродинамической и температурной моделям (по ГДМ и ТМ) существенно отличаются при длинах затворов, намного превышающих длины релаксации импульса электронов в слоях гетероструктур. В сравнении с результатами ГДМ получены величины погрешностей, возникающих при использовании ТМ при моделировании и расчете характеристик rHEMT транзисторов.

2. Исследованы особенности нелокального разогрева электронов в полевых транзисторах на основе GaN и GaAs. Показано, что из-за сильного эффекта всплеска дрейфовой скорости средняя величина дрейфовой скорости под затвором транзистора на основе GaAs выше, чем под затвором транзистора на основе GaN при большей величине максимальной сильнополевой статической дрейфовой скорости электронов в GaN. Эта особенность сравнительного поведения величин средней дрейфовой скорости в GaN и GaAs транзисторах сохраняется даже при искусственном задании величины слабополевой подвижности электронов в GaAs такой же, как в GaN.

3. Показано, что введение в DrHEMT гетероструктуру высоких локализирующих потенциальных барьеров, уменьшающих поперечный пространственный перенос электронов с сопутствующим подавлением проникновения горячих электронов в эти барьеры при усилении эффекта размерного квантования и обеспечении увеличенной плотности электронов в слое InGaAs

канала, позволяет существенно увеличить выходную мощность и коэффициент усиления ПТШ.

4. Показано, что при оптимальном соотношении толщин i - p - i -(δ :Si) слоев структуры в барьере Шоттки (DA)-DpHEMT транзистора можно создавать мощные ПТШ, с максимумом выходной СВЧ мощности, достигаемом при задании напряжения «затвор – исток», равного нулю.

5. Методом формирования омических контактов в заглаблениях с удаленными акцепторными слоями решена проблема формирования контактов истока и стока с линейной вольтамперной характеристикой (ВАХ) и малым удельным сопротивлением.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Из-за влияния поперечного пространственного переноса электронов при переходе от гидродинамической к температурной модели в результатах расчета характеристик полевых транзисторов на GaAs гетероструктурах с селективным легированием возникает погрешность более 20 % при длинах затвора менее 1 мкм.

В полевых транзисторах на GaN гетероструктурах из-за большой энергии оптического фонона и, соответственно, малого всплеска дрейфовой скорости электронов такая же погрешность возникает при длинах затвора менее 0,05 мкм.

2. Формирование в AlGaAs слоях (DA)-DpHEMT гетероструктуры высоких локализующих потенциальных барьеров и увеличение плотности электронов в слое InGaAs канала позволяет создавать мощные транзисторы, имеющие на частоте 10 ГГц удельную выходную мощность, коэффициент усиления и КПД более 1,6 Вт/мм, 9 дБ и 50% при длине трапециевидного затвора 0,5 мкм.

3. Использование при изготовлении омических контактов истока и стока в (DA)-DpHEMT транзисторах заглабления с удаленными акцепторными слоями позволяет формировать омические контакты с линейной ВАХ и удельным сопротивлением ме-

нее $0,8 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$ – на уровне результатов, типичных для DpHEMT транзисторов.

4. Оптимизация соотношения толщин слоев i-p-i- (δ :Si) структуры в барьере Шоттки позволяет создавать мощные транзисторы, наиболее эффективно работающие при нулевом смещении на затворе и имеющие на частоте 10 ГГц удельную выходную мощность, коэффициент усиления и КПД более 1,5 Вт/мм, 12 дБ и 40% при длине Г - образного затвора равной 0,3 мкм.

Практическая ценность работы.

1. Получено существенное увеличение выходной СВЧ мощности и коэффициента усиления ПТШ при введении в DpHEMT гетероструктуру высоких локализирующих потенциальных барьеров, уменьшающих поперечный пространственный перенос электронов с сопутствующим подавлением проникновения горячих электронов в эти барьеры, усилением эффекта размерного квантования и увеличении плотности электронов в слое InGaAs канала. Это техническое решение при оптимизации соотношения толщин слоев, образующих барьер Шоттки в (DA)-DpHEMT, также позволяет создавать мощные ПТШ, наиболее эффективно работающие при нулевом смещении на затворе.

2. Предложена и подтверждена на практике возможность формирования омических контактов с линейными вольт-амперными характеристиками и пониженными сопротивлениями истока и стока в (DA)-DpHEMT транзисторах при формировании омических контактов в заглаблениях с удаленными акцепторными слоями.

3. Разработанные технические решения использованы при изготовлении ряда экспериментальных образцов транзисторов в (DA)-DpHEMT исполнении. Применение этих решений позволило:

- при длине трапецевидного затвора, равной 0,5 мкм изготовить экспериментальные образцы мощных ПТШ с удельной

мощностью, коэффициентом усиления и КПД на частоте 10 ГГц более 1,6 Вт/мм, 9 дБ, 50% соответственно,

- изготовить экспериментальные образцы мощных ПТШ с удельной мощностью, коэффициентом усиления и КПД на частоте 10 ГГц более 1,5 Вт/мм, 12 дБ и 40%, соответственно, при длине Г - образного затвора, равной 0,3 мкм, наиболее эффективно работающие при нулевом смещении на затворе.

Апробация результатов работы.

Результаты работы опубликованы в материалах следующих международных конференций: "СВЧ- техника и телекоммуникационные технологии", «КрыМикО», Севастополь, 10-14 сентября 2007г., 10-14 сентября 2001г., 14-18 сентября 2009г., 10—14 сентября 2012г., 8—13 сентября 2013г., 7—13 сентября 2014г.; 10 Международная научно-практическая конференция «Нанотехнологии – производству 2014» г. Фрязино Московской обл., 2-4 апреля 2014г.; Всероссийская конференция Микроэлектроника СВЧ, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 4-7 июня 2012 г., 2-5 июня 2014 г.; 11 Российская конференция по физике полупроводников, Санкт-Петербург, 16–20 сентября 2013г.

Публикации. По материалам диссертации автором опубликовано 24 печатных работы, из них 11 работ в журналах по перечню ВАК для защиты кандидатских диссертаций, получено 3 патента РФ.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения, списка литературы. Работа выполнена на 127 страницах текста, содержит 34 рисунка, 7 таблиц и список литературы из 102 наименований.

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 необходимость теоретического анализа разогрева электронов для задания приближен-

ного к оптимальному профилю легирования в локализирующих барьерах и практическая важность работы.

В первой главе приведены результаты исследований особенностей нелокального разогрева электронов в современных гомо- и гетероструктурах.

В разделе 1.1. проводится исследование границ применимости квазигидродинамических моделей для расчета полевых транзисторов на гетероструктурах с селективным легированием. Широкое использование гетероструктур и наметившаяся в последние годы активность в разработке достаточно точных и быстродействующих программ моделирования физических процессов и расчета характеристик транзисторов, ставит вопрос физической адекватности моделей, используемых в этих программах. В настоящее время в большинстве полевых СВЧ транзисторов размеры активной области становятся сравнимыми с длинами релаксации импульса и энергии электронов. Длины релаксации из-за сложного распределения электрического поля, в свою очередь, могут сильно меняться по длине в промежутке между истоком и стоком. В этих условиях строгое определение границ применимости тех или других физических моделей до сих пор остается серьезной проблемой: простые критерии по сравнению размеров пролетной области с длинами релаксации электронов не позволяют оценить точность моделей, и для этого приходится непосредственно использовать численные расчеты. Известно, что динамика электронов в приборах с характерными размерами порядка десятых долей микрона, а, соответственно, и характеристики этих приборов, физически более адекватно и точно описываются кинетическим уравнением Больцмана, решаемым методом Монте-Карло. Однако, из-за большого потребления вычислительных ресурсов и сложности, этот метод до сих пор мало применяется для подбора параметров гетероструктур и оптимизационных расчетов транзисторов. Из-за приемлемо малой вычислительной ресурсоемкости на практике основными расчетными моделями пока остаются различные модификации ГДМ и ТМ. При этом минимальной вычислительной ресурсоемкостью

обладают ТМ, что делает их весьма привлекательными, но важно найти границы физически адекватной применимости ТМ в сравнении с ГДМ.

Известно, что уже при длинах затвора менее 0,25 мкм использование ТМ вместо ГДМ может приводить к существенным погрешностям при расчёте характеристик гомоструктурных ПТШ на основе GaAs с объемнолегированным каналом. В разделе 1.1 проясняется проблема физически адекватной применимости ТМ в сравнении с ГДМ и для гетероструктурных ПТШ, в том числе и для транзисторов в рНЕМТ исполнении.

В параграфе 1.1.1 приведена используемая в работе ГДМ полевого транзистора. В этой модели описывается поведение двух ансамблей электронов. Первый ансамбль расположен в слое GaAs, или InGaAs узкозонного канала, образующего квантовую яму (КЯ), второй - в контактирующем с ним широкозонном слое (AlGaAs). Каждый слой характеризуется одной эффективной долиной с временами релаксации импульса и энергии электронов, определяемыми из расчетов методом Монте – Карло для объемных материалов. Переходы горячих электронов между контактирующими слоями описываются в приближении надбарьерной термоэлектронной эмиссии. Проводимость канала определяется в приближении треугольной потенциальной ямы с учетом всех размерно-квантовых подзон. В расчетах учитываются переходы электронов в результате разогрева из КЯ в широкозонный слой и обратные переходы (поперечный пространственный перенос), а также увеличение эффективных длин локализации горячих электронов в слоях гетероперехода при усилении разогрева. Фактически, в используемой одномерной ГДМ поставлена и решается квазидвумерная самосогласованная задача описания динамики электронов в двух соседних слоях.

В параграфе 1.1.1 также приведено сравнение результатов расчетов для гетероструктурных ПТШ по гидродинамической и температурной моделям. Показано, что даже при сравнительно больших длинах затвора 0,5 мкм (и менее), в отдельных режимах работы ПТШ разница величин тока стока и крутизны, вычисляемых по этим моделям может быть больше 20 %. Рассматрива-

ются различия в распределениях дрейфовой скорости по слоям в промежутке «исток-сток», рассчитанных по ГДМ и ТМ. Демонстрируется, что главная причина различий - поперечный пространственный перенос (если его убрать из расчетов, то при длине затвора 0,5 мкм разница в распределениях дрейфовых скоростей, рассчитанных по ГДМ и ТМ, составит всего несколько процентов).

Различия в результатах расчетов заметно возрастают с увеличением мольной доли индия в узкозонном слое канала. Показано, что для транзисторов на гетероструктурах $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As} - \text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ существенные различия в результатах расчетов величин токов стока и крутизны начинаются при длинах затвора около 1 мкм, а при более коротких затворах они начинают носить не только количественный, но и качественный характер.

В разделе 1.2. исследуются особенности формирования области интенсивного тепловыделения в полевых транзисторах. Известно, что для правильного конструирования мощных полевых транзисторов необходимо знать температуру его канала. В свою очередь, для расчета максимальной температуры канала и анализа тепловых режимов работы мощных ПТШ, существенное значение приобретает оценка размеров области наиболее интенсивного тепловыделения.

В параграфе 1.2.1 приводятся простые формулы, позволяющие рассчитывать интенсивность тепловыделения в каналах гомо и гетероструктурных ПТШ. Приводятся особенности распределения плотности мощности в гомоструктурных полевых транзисторах. Демонстрируется, что в мощных транзисторах с коротким затвором область выделения мощности за период СВЧ изменения потенциала затвора может перемещаться от затвора к стоку и обратно. Таким образом, может реализовываться режим, в котором температурная нагрузка в транзисторе минимальна (температура канала падает на 10 - 30 градусов).

Показано, что в рНЕМТ транзисторах, по крайней мере в тех, которые рассматривались при расчетах, область наиболее интенсивного тепловыделения жестко локализована у стокового

края затвора, а большая часть энергии при этом выделяется в широкозонном слое.

В параграфе 1.2.2 исследуется физический механизм данной особенности.

Показано, что за жесткую локализацию домена сильного поля у стокового края затвора транзистора отвечает поперечный пространственный перенос электронов. Это один из основных физических эффектов, обуславливающих особенности транспорта горячих электронов по длине канала в рНЕМТ транзисторах, сильно влияющий на форму и величину всплеска дрейфовой скорости электронов под затвором, а также на величину тока стока, особенно при открытом канале транзистора.

В разделе 1.3 рассматриваются особенности нелокального разогрева электронов в полевых транзисторах на основе нитрида галлия. На примере расчета тестовой структуры - приближенного аналога реальной GaN гетероструктуры, сравнивается нелокальный дрейф электронов в ПТШ на основе GaN и на основе GaAs с той же слабополевой подвижностью электронов.

Показано, что несмотря на большую величину максимума полевой зависимости статической дрейфовой скорости, быстродействие GaN - ПТШ не выше быстродействия GaAs - ПТШ даже при искусственном задании величины слабополевой подвижности электронов в GaAs такой же, как в GaN и, соответственно, гораздо ниже быстродействия рНЕМТ. Этот эффект связан с тем, что из-за малых времен релаксации по энергии, обусловленных большой энергией оптического фона, дрейфовая скорость электронов в максимуме на ее распределении в GaN - ПТШ заметно ниже, чем в GaAs - ПТШ. Рассматриваются распределения времен релаксации в таких приборах.

Демонстрируется, что в большой области, даже под коротким субмикронным затвором, электронный транспорт в GaN - ПТШ практически локален. Нелокальные эффекты ярко проявляются только у стокового края затвора. В то же время в GaAs - ПТШ нелокальный дрейф электронов (наблюдаемый в области, где дрейфовая скорость превышает максимальную статическую дрейфовую скорость) имеет место практически под всем затво-

ром. Показано, что малые времена релаксации по энергии приводят еще к одному интересному, и, в определенной мере (в плане экономии при моделировании вычислительных ресурсов за счет использования ТМ), полезному эффекту. Моделирование показало, что в транзисторах на основе GaN, даже при малой длине затвора, равной 0,05 мкм, результаты расчетов по ГДМ и ТМ отличаются не слишком сильно, что обуславливает малую погрешность при ТМ моделировании GaN - ПТШ.

Во второй главе представлены результаты разработки транзисторов с локализуемыми барьерами в исполнении (DA)-DrHEMT.

В разделе 2.1 приведены предпосылки разработки транзисторов в исполнении (DA)-DrHEMT. Выходные характеристики гетероструктурных полевых транзисторов определяется многими факторами: параметрами гетероструктуры, топологией конструкции, технологией и маршрутом изготовления элементов конструкции ПТШ и т.д. При этом важно, что только конструкция гетероструктуры, оптимизированная с учетом особенностей транспорта электронов, налагаемых условиями работы транзистора, позволяет получить наилучшие характеристики мощных СВЧ DrHEMT.

Для увеличения выходной СВЧ мощности при разработке гетероструктур для DrHEMT транзисторов важно обеспечить максимальную проводимость канала на участке насыщения выходных ВАХ. Попытки оптимизации в этом направлении гетероструктур для мощных pHEMT и DrHEMT блокируются набором жестких физических и технологических ограничений, который, на первый взгляд, не позволяет получать удельную выходную мощность серийных ПТШ заметно больше 1 Вт/мм на частоте 10 ГГц.

Одним из основных механизмов, ограничивающих эту мощность в pHEMT, является поперечный пространственный перенос электронов из InGaAs - канала гетероструктуры, возникающий при их разогреве продольным электрическим полем (рис.1). Этот перенос стимулируется кулоновским электрон-

электронным и электрон-донорным взаимодействием, он приводит к усилению заполнения горячими электронами слоев AlGaAs вблизи доноров, что снижает подвижность горячих электронов. Типичная величина разрыва дна зоны проводимости на гетерогранице AlGaAs-InGaAs в рHEMT и в DpHEMT сравнительно мала и составляет примерно 0,3 эВ. Такой глубины потенциальной ямы InGaAs-канала недостаточно для сохранения преимущественной локализации электронов в InGaAs - канале при их сильном разогреве, характерном для работы рHEMT и DpHEMT.

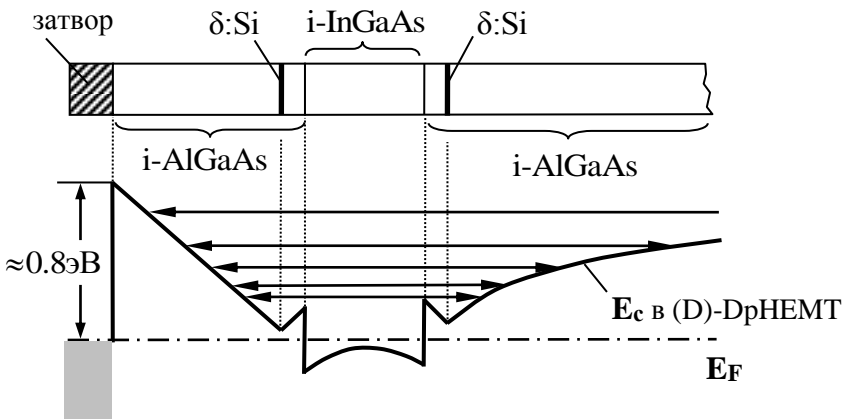


Рис.1. Зонная диаграмма DpHEMT гетероструктуры с контактом Шоттки. Стрелки показывают область расположения горячих электронов с различной энергией, показано проникновение горячих электронов в AlGaAs-слои. i - нелегируемые слои.

Похожий эффект наблюдается при попытках увеличения уровня легирования рHEMT и DpHEMT- гетероструктур донорами: потенциальная яма InGaAs-канала оказывается полностью заполненной электронами, начинается параллельное заполнение электронами AlGaAs-слоев. В результате даже слабополевая подвижность электронов оказывается недопустимо малой, проводимость канала и выходная СВЧ мощность практически перестает увеличиваться при росте уровня легирования донорами.

Простые оценки показывают, что при введении в структуру встроенных потенциальных барьеров, усиливающих локализацию горячих электронов в слое InGaAs-канала, степень их локализации в AlGaAs-слоях может уменьшиться в несколько раз.

Существует проблема выбора оптимального метода создания достаточно высоких и резких локализирующих потенциальных барьеров. Использование $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ гетеробарьеров для создания локализирующих потенциальных барьеров не дает нужного эффекта, так как величина разрыва дна зоны проводимости при повышении содержания алюминия увеличивается недостаточно сильно. Кроме этого, в слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с большим содержанием алюминия ($x \geq 0,35$) формируются глубокие DX центры, захватывающие электроны и происходит инверсия долин в зоне проводимости, что резко усиливает интенсивность рассеяния горячих электронов, проникающих в широкозонные слои.

Пригодных для обеспечения хорошей локализации горячих электронов сравнительно узкозонных гетероструктур с большим (более 0,5 эВ) разрывом дна зоны проводимости, технологии которых освоены в серийном производстве, пока нет. По этой причине было выбрано решение: для построения локализирующих барьеров использовать донорно-акцепторное легирование широкозонных слоев в уже освоенных традиционных DpHEMT гетероструктурах.

Достаточные по высоте локализирующие барьеры в (DA)-DpHEMT гетероструктурах формировались с помощью встроенных полей зарядов доноров и акцепторов в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ – слоях с $x \leq 0,35$, задавался p-i-n профиль легирования при избыточном легировании донорами. Использовалась технология дельта-легирования донорами ($\delta:\text{Si}$), дающая максимальную локализацию горячих электронов в слое InGaAs-канала. При этом каждый $\delta:\text{Si}$ - слой выполняет двойную функцию: участвует в формировании локализирующего барьера и обеспечивает поставку электронов в InGaAs-канал. Схематические зонные диаграммы

(DA)-DpHEMT гетероструктуры в сравнении с DpHEMT гетероструктурой показаны на рис.2.

(DA)-DpHEMT гетероструктура имеет такие потенциальные преимущества перед традиционной DpHEMT гетероструктурой:

- уменьшение рассеяния горячих электронов в широкозонном материале за счет уменьшения толщины слоя широкозонного материала, в котором они могут находиться, уменьшения величины квадрата волновой функции электронов вблизи высоких локализирующих барьеров и усиления эффекта размерного квантования;

- увеличение поверхностной плотности электронов в сравнительно более узкой и глубокой квантовой яме канала;

- уменьшение туннельного переноса электронов между затвором и каналом за счет увеличения средней толщины потенциального барьера контакта Шоттки;

- уменьшение поверхностной плотности горячих электронов в широкозонных слоях и улучшение управления током стока при больших прямых смещениях контакта Шоттки.

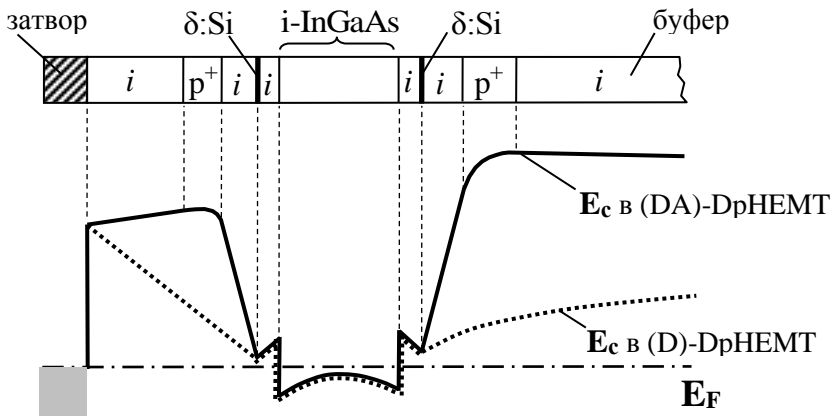


Рис.2. Сравнение зонных диаграмм AlGaAs-InGaAs-GaAs DpHEMT структур с донорным (D) и с донорно-акцепторным (DA) легированием. i - нелегируемые слои, p^+ - легированные Be слои.

В разделе 2.2 представлены результаты измерений характеристик экспериментальных образцов ПТШ в исполнении (DA)-DrHEMT. Для первых экспериментов изготавливались транзисторы с трапециевидным, а не с Т-образным или Г-образным затвором. Серийные ПТШ в исполнении DrHEMT на частоте 10 ГГц обеспечивали величину удельной выходной СВЧ мощности менее 1 Вт/мм (обычно $0,8 \div 0,9$ Вт/мм). Удельную выходную СВЧ мощность в 1 Вт/мм обеспечивали лишь ПТШ с Г-образным затвором при длине затвора около 0,15 мкм. Экспериментальные образцы ПТШ с трапециевидным затвором длиной 0,5 мкм из партий 1 и 2 показали при измерениях на частоте 10 ГГц в непрерывном режиме величину удельной выходной мощности более 1,3÷1,4 Вт/мм, коэффициент усиления более 8 дБ, КПД около 50%. ПТШ из партии 3 с трапециевидным затвором длиной 0.5 мкм показали при измерениях на частоте 10 ГГц в непрерывном режиме величину удельной выходной мощности более 1,6 Вт/мм, коэффициент усиления более 9 дБ, КПД около 50% (таблица 1).

Таблица 1. Результаты измерений в непрерывном режиме.

| № | $P_{\text{входа}}$ мВт | $P_{\text{выхода}}$ мВт | K_P Дб | $I_{\text{стока}}$ мА | $U_{\text{стока}}$ В | КПД % | $P_{\text{вых}}/W_g$ Вт/мм |
|---|---------------------------|----------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------|----------|-------------------------------|
| 1 | 30 | 455 | 11,8 | 210 | 9 | - | - |
| | 150 | 1150 | 8,8 | 260 | 8 | 50 | 1,44 |
| | 150 | 1280 | 9,3 | 270 | 9 | 46 | 1,60 |
| 2 | 30 | 460 | 11,8 | 220 | 9 | - | - |
| | 150 | 1135 | 8,8 | 245 | 8 | 50,3 | 1,42 |
| | 150 | 1300 | 9,4 | 255 | 9 | 50,1 | 1,63 |
| 3 | 30 | 460 | 11,8 | 240 | 9 | - | - |
| | 150 | 1145 | 8,8 | 240 | 8 | 51,8 | 1,43 |
| | 150 | 1310 | 9,4 | 245 | 9 | 52,6 | 1,64 |

В импульсном режиме (длина импульса $\tau = 10$ мкс, скважность $Q = 4$) результаты (таблица 2), полученные на транзисторах из партии 3 на частоте 10 ГГц, выглядят еще более впечатляюще:

Таблица 2. Результаты измерений в импульсном режиме.

| № | $P_{\text{входа}}$ мВт | $P_{\text{выхода}}$ мВт | K_p Дб | $I_{\text{стока}}$ мА | $U_{\text{стока}}$ В | КПД % | $P_{\text{вых}}/W_g$ Вт/мм |
|---|---------------------------|----------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------|----------|-------------------------------|
| 1 | 30 | 500 | 12,2 | 250 | 9 | - | - |
| | 150 | 1320 | 9,4 | 260 | 8 | 56 | 1,65 |
| | 150 | 1420 | 9,8 | 290 | 9 | 46 | 1,78 |
| 2 | 30 | 490 | 12,1 | 230 | 9 | - | - |
| | 150 | 1300 | 9,4 | 260 | 8 | 55,2 | 1,62 |
| | 150 | 1430 | 9,8 | 275 | 9 | 51,7 | 1,79 |
| 3 | 30 | 505 | 12,2 | 250 | 9 | - | - |
| | 150 | 1310 | 8,9 | 265 | 8 | 54,7 | 1,63 |
| | 150 | 1450 | 9,8 | 285 | 9 | 50,7 | 1,81 |

В разделе 2.3 проведен анализ физических механизмов, позволивших получить столь значительный рост выходных параметров. Приводятся оценки, которые позволяют сделать вывод, что введение локализирующих потенциальных барьеров резко уменьшает влияние поперечного переноса электронов и подавляет паразитные каналы проводимости по широкозонным слоям в (DA)-DrHEMT, а интенсивность рассеяния за счет квантовых эффектов заметно падает. Оценки также приводят к выводу о том, что улучшение омических контактов, применение T-образного или Г-образного затвора длиной менее 0,25 мкм (если не сработает какой-нибудь новый, неизвестный пока эффект) дополнительно увеличит мощность, даст заметное увеличение коэффициента усиления и КПД, а также позволит на частоте 10 ГГц выйти на следующий уровень по параметрам транзисторов: удельная мощность более 2,5 Вт/мм, коэффициент усиления в насыщении более 13 дБ, КПД при настройке на максимальную мощность 55 ÷ 60%.

В разделе 2.4 приводятся результаты исследования (DA)-DrHEMT транзисторов, с максимумом выходной СВЧ мощности, достигаемом при задании напряжения «затвор – исток», равного нулю. Создать мощный rHEMT или DrHEMT транзистор с обычным донорным легированием, наиболее эффективно

работающий при нулевом смещении на затворе, без принятия специальных мер крайне сложно. Решить эту проблему оказалось возможным в (DA)-DpHEMT транзисторах после необходимой оптимизации соотношения толщин i - p - i -(δ :Si) слоев структуры, фактически являющейся своеобразным делителем напряжения «затвор-исток» встроенным в барьер Шоттки.

Показано, что в (DA)-DpHEMT положение оптимальной рабочей точки можно вообще сдвинуть в диапазон положительных напряжений на затворе (таблица 3) при одновременном соблюдении условия сохранения приемлемо малых токов затвора. Такие (DA)-DpHEMT имели пробивное напряжение 25 - 28 В при ширине затвора $W_g = 0,8$ мкм, длине Г-образного затвора около 0,3 мкм, напряжение перекрытия (-1,5) В. В таблице 3 представлены типичные результаты измерений характеристик таких приборов, эффективно работающих при нулевом смещении на затворе. Измерения проводились на частоте 10 ГГц.

Таблица 3. Результаты измерений в импульсном режиме.

| № | $P_{\text{входа}}$ мВт | $P_{\text{выхода}}$ мВт | K_P Дб | $I_{\text{стока}}$ мА | $U_{\text{затвора}}$ В | $U_{\text{стока}}$ В | КПД % | $P_{\text{вых}}/W_g$ Вт/мм |
|---|---------------------------|----------------------------|-------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|----------|-------------------------------|
| 1 | 10 | 190 | 12,8 | 195 | -0,3 | 8 | - | - |
| | 100 | 925 | 9,7 | 200 | -0,3 | 8 | 51,5 | 1,15 |
| | 125 | 1345 | 10,3 | 250 | -0,45 | 12 | 40,7 | 1,68 |
| | 125 | 1380 | 10,4 | 260 | 0 | 12 | 40,2 | 1,72 |
| | 125 | 1325 | 10,3 | 240 | 0 | 11 | 45 | 1,66 |
| | 125 | 1160 | 9,7 | 220 | 0 | 10 | 47 | 1,45 |
| | 125 | 1390 | 10,5 | 260 | 0,1 | 12 | 40,5 | 1,73 |
| | 125 | 1380 | 10,4 | 260 | 0,2 | 12 | 40,2 | 1,72 |
| 2 | 30 | 640 | 13,3 | 210 | 0 | 12 | - | - |
| | 50 | 905 | 12,6 | 210 | 0 | 12 | 40 | 1,13 |
| | 70 | 1215 | 12,4 | 220 | 0 | 12 | 43 | 1,52 |
| | 100 | 1315 | 11,2 | 235 | 0 | 12 | 43 | 1,64 |
| | 125 | 1345 | 10,3 | 240 | 0 | 12 | 42 | 1,68 |
| | 125 | 1340 | 10,3 | 225 | -0,3 | 12 | 45 | 1,68 |
| | 100 | 1005 | 10 | 180 | -0,3 | 10 | 50 | 1,25 |

В разделе 2.5 представлены результаты разработки омических контактов истока и стока в (DA)-DpHEMT транзисторах.

Первые эксперименты показали, что омические контакты истока и стока в (DA)-DpHEMT хуже, чем в обычных DpHEMT. Для улучшения омических контактов была изготовлена конструкция транзистора с заглублением положения нижней границы металлизации омического контакта под слой InGaAs -канала. Исходное заглубление в структуре формировалось методом анизотропного травления, что позволило сформировать его стенки с боковым наклоном. Геометрия боковых стенок заглубления при напылении позволяет обеспечить их бездефектное покрытие металлом и позволяет осуществить формирование омического контакта непосредственно к рекристаллизованному InGaAs – слою канала транзистора, имеющему выход на боковых стенках. В таком контакте встроенные потенциальные барьеры или области с повышенным сопротивлением не препятствуют протеканию электрического тока в канал. На практике подтвердилось, что при формировании омических контактов в заглублениях практически полностью исключаются проблемы, связанные с наличием верхних акцепторных слоев в гетероструктуре. Омические контакты имеют линейную ВАХ и малое переходное сопротивление - не хуже омических контактов в ПТШ традиционного DpHEMT исполнения.

В заключении сформулированы основные полученные результаты:

Показано, что пренебрежение в расчетах инерционностью изменения импульса приводит к существенным (более 20%) погрешностям в расчетах распределений дрейфовой скорости в канале ПТШ и выходных характеристик прибора при длинах активной области, намного превышающих длину релаксации импульса электронов. Погрешность возникает из-за сильных продольных и поперечных градиентов электрического поля в канале, особенностей нелокального разогрева электронов, сильного поперечного переноса электронов из канала. Поперечные размеры слоя канала всегда меньше длины релаксации импульса, поперечные потоки электронов через гетерограницы канала велики

и в достаточно слабых полях. Следствие: разница в результатах моделирования рНЕМТ транзисторов на основе GaAs, получаемых в ГДМ и ТМ становится велика даже при достаточно больших (порядка 1 мкм) длинах затвора при открытом канале ПТШ. Результаты расчетов характеристик ПТШ на гетероструктурах ($\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ - $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$) оказываются гораздо более чувствительными к выбору модели расчетов, чем результаты расчетов характеристик ПТШ на гетероструктурах ($\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ - GaAs).

Показано, что именно поперечный перенос ведет к жесткой локализации домена сильного поля у стокового края затвора.

Показано, что из-за малых времен релаксации энергии электронов в GaN - ПТШ максимальная величина дрейфовой скорости в промежутке «исток – сток» меньше, чем в GaAs - ПТШ. Поэтому, несмотря на большие величины в максимуме полевой зависимости дрейфовой скорости электронов, из-за особенностей формы распределения дрейфовой скорости по длине канала, GaN - ПТШ имеют быстроедействие не выше, чем GaAs - ПТШ даже при искусственном задании величины слабополевой подвижности электронов в GaAs такой же, как в GaN. В отличие от ПТШ на основе GaAs, ТМ дает приемлемо малую погрешность при расчете GaN - ПТШ с короткими субмикронными затворами (до длин затвора, превышающих 0,05 мкм).

Разработана (DA)-DrНЕМТ гетероструктура, улучшающая выходные характеристики мощных ПТШ за счет ограничения поперечного пространственного переноса электронов из слоя канала в широкозонные слои локализующими потенциальными барьерами. ПТШ в исполнении (DA)-DrНЕМТ при длине трапецевидного затвора 0,4 – 0,5 мкм и общей ширине затвора 0,8 мм на частоте 10 ГГц имеют коэффициент усиления более 9 дБ, удельную выходную мощность более 1,6 Вт/мм, КПД по добавленной мощности до 50%.

Впервые в результате разработки изготовлены ПТШ в исполнении (DA)-DrНЕМТ, обеспечивающие максимум выходной СВЧ мощности при задании напряжения «затвор – исток», равного нулю. Такие транзисторы с шириной затвора 0,8 мм при

длине Γ – образного затвора около 0,3 мкм, напряжениях на затворе в диапазоне от +0,2 до -0,2 В и напряжении на стоке 12 В, на частоте 10 ГГц в импульсном режиме демонстрируют удельную выходную мощность более 1,6 Вт/мм при коэффициенте усиления более 11 дБ и КПД по добавленной мощности более 40%. При уменьшении удельной выходной мощности до 1,5 Вт/мм коэффициент усиления возрастает до 12,5 дБ. При уменьшении напряжения на стоке до 8-10 В и коэффициента усиления до 10 дБ, КПД по добавленной мощности возрастает до 50%.

На практике показано улучшение омических контактов истока и стока в ПТШ исполнения (DA)-DrHEMT за счет введения заглупления в области формирования омических контактов. Данный технический прием позволил получать линейный омический контакт с малым (менее 0,8 Ом·мм) удельным сопротивлением контактов, т.е. на уровне величин в ПТШ традиционного DrHEMT исполнения.

Публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК.

1. П.В.Бережнова, А.Б.Пашковский, А.К.Ратникова, В.М.Лукашин “Оценка области нелокального тепловыделения в мощных гетероструктурных полевых транзисторах” Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. Вып.4 (492), 2007, с. 21 - 24.
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, с. 113-118.
3. 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 г. No 4, с. 67-71.
4. 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.

5. 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.
6. К.С.Журавлев, В.Г.Лапин, В.М. Лукашин, А.Б.Пашковский, А.Б.Соколов, А.И.Торопов “Серийный рНЕМТ с удельной мощностью 1,4 Вт/мм” //Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2012, В.1(512), с. 55- 61.
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, с. 684-692.
9. 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.
10. 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.
11. 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.

Патенты и свидетельства

1. 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.
2. Патент РФ на полезную модель №106442 по заявке № 2011112315/28. Приоритет от 31.03.2011. Опубликовано: 10.07.2011. Эпитаксиальная структура с широкозонным инжектором для полевых транзисторов // В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский.
3. 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.

Другие публикации по теме диссертации.

1. П.В.Бережнова, В.М.Лукашин, А.Б.Пашковский “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. С. 119-120.
2. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Горопов, 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.
3. В.М.Лукашин, А.Б.Пашковский, К.С.Журавлев, А.И.Горопов, 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.
4. А. А.Капралова, В.М.Лукашин, А.Б.Пашковский “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 с. 153-154.
 5. 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.
 6. 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.
 7. 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 2013г. Тезисы докладов с.71.
 8. 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 «ИС-ТОК». Пульсар – 2013 "Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА" Материалы конференции с. 45 – 48, 24 – 25 октября 2013.

9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
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” 24-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2014). Севастополь, 7—13 сентября 2014г. Материалы конференции с. 79-80.

Подписано в печать 17.03.2015 г.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Формат А4/2. Усл. печ. л.1.
Заказ № 243. Тираж 50 экз.
Типография «КОПИЦЕНТР»
119234, г. Москва, Ломоносовский пр-т, д.20
Тел. 8 (495) 213-88-17
www.autoreferat1.ru