

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ИСТОК» ИМЕНИ А.И.ШОКИНА»**

На правах рукописи

ЛАПИН

Владимир Григорьевич

УДК.621.382.323

**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»**

г. Фрязино 2019г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНЫХ СЕРИЙНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ n- GaAs	33
1.1. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО НАБЛЮДАЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И ПУТИ ИХ УЛУЧШЕНИЯ	33
1.1.1 Влияние глубоких уровней на характеристики полевых транзисторов	36
1.1.2. Дрейф параметров полевых транзисторов вызванный эффектами сильного поля	41
1.1.3. Эффекты сильного поля и фоточувствительность полевых транзисторов	47
1.2. СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ	55
1.2.1. Зависимость характеристик барьеров Шоттки полевых СВЧ транзисторов от особенностей химической обработки	59
1.2.2. Улучшение качества омических контактов GaAs полевых транзисторов при введении в них диффузионного барьера	66
1.3. НАКЛОННОЕ НАПЫЛЕНИЕ ЗАТВОРА В ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ	71
1.3.1. Особенности конструкции мощного полевого транзистора при наклонном напылении металлизации затвора	77
1.3.2. Зависимость параметров мощного полевого транзистора от угла напыления металлизации затвора	82
1.4. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С Г-ОБРАЗНЫМ ЗАТВОРОМ	90
1.4.1 Технология Г - образного затвора	91
1.4.2 Технология Г-образного затвора	93
1.4.3 Характеристики приборов на основе транзисторов с Г- образным затвором	101

1.4.4. Конструктивно-технологические преимущества Г-образного затвора транзисторов в сравнении с Т-образным затвором	110
1.5. НАДЕЖНОСТЬ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ.	115
1.5.1 Определение значений характеристических параметров транзисторов	119
1.5.2 Применение базовых показателей $\lambda_{т.э}$ при расчете надежности радиоэлектронных изделий	123
1.5.3. Результаты анализа надежности	124
1.6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 1	126
ГЛАВА 2. ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ И ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С УСИЛЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ В КАНАЛЕ	130
2.1. ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ В ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ	133
2.2. ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ DA-pHEMT ГЕТЕРОСТРУКТУР	149
2.3. МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ УЛУЧШЕНИЕ ВЫХОДНЫХ СВЧ ХАРАКТЕРИСТИК DA-DpHEMT ТРАНЗИСТОРОВ	163
2.3.1. Модели традиционных гетероструктур, описывающие нелокальный разогрев электронов	163
2.3.2. Описание гидродинамической модели	165
2.3.3. Модель гетероструктуры с сильной локализацией электронов в слое канала	170
2.4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВСПЛЕСКА ДРЕЙФОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУРАХ	181
2.4.1 Оценка дрейфовой скорости электронов в DA-pHEMT транзисторах и перспективы их применения в миллиметровом диапазоне длин волн	181
2.4.2. Всплеск дрейфовой скорости электронов в гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием	189

2.5. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ДОНОРНО – АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ	206
2.5.1 Локализация домена сильного поля	206
2.5.2. Тепловые характеристики полевых транзисторов	212
2.5.3. Алмазоподобное покрытие	227
2.6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 2	239
ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ДОНОРНО – АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ	243
3.1 ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ DA-pHEMT И DA-DpHEMT ТРАНЗИСТОРОВ	243
3.2 СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ DA-DpHEMT И DpHEMT ТРАНЗИСТОРОВ	256
3.3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ DA- DpHEMT ТРАНЗИСТОРОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК	257
3.4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ	265
3.5 МОЩНЫЕ DA- DpHEMT ТРАНЗИСТОРЫ С ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ТОЧКОЙ ПРИ НУЛЕВОМ НАПРЯЖЕНИИ НА ЗАТВОРЕ	273
3.6 ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ DA- pHEMT И DA- DpHEMT ТРАНЗИСТОРОВ	284
3.7 РАЗРАБОТКА СВЧ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ НА ТРАНЗИСТОРАХ С ДОНОРНО - АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ	289
3.7.1 Сравнение выходных характеристик усилительных каскадов на основе DA-DpHEMT и DpHEMT транзисторов с одинаковой топологией	290
3.7.2 Сравнение выходных характеристик усилительных каскадов на основе DA-DpHEMT и DpHEMT, изготовленных по разным технологиям	295
3.8 ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 3	298
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	299

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	300
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	328
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 ВНЕДРЕНИЕ	336
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 СПИСОК ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЯ	337

ВВЕДЕНИЕ

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 повышения параметров и улучшения их воспроизводимости.

Постановка задачи - для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

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

- разрабатывались оригинальная конструкция, способ и технология изготовления Γ – 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 (ЗП612 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. Фрэнкзе», 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 ДрНЕМТ – 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. 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 349 страницах текста, содержит 95 рисунков, 24 таблицы и список литературы из 258 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 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 $Al_xGa_{1-x}As$, 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 мезоструктур, сформированных на полуизолирующей подложке из GaAs. Для транзисторов с затвором, имеющим трапециевидную или треугольную форму поперечного сечения, получены зависимости выходной СВЧ мощности, коэффициента усиления и КПД от положения основания затвора между истоком и стоком.

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.

В подразделе 1.4.1 проанализированы технологические особенности и проблемы, возникающие при формировании ставшего традиционным Г-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 аттенуаторов 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 $0,1 \div 0,3$ 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 ПБО. 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 ПБО РЭИ взамен значений, определяемых для полевых транзисторов по справочнику "Надежность ЭРИ" (22ЦНИИИ 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 $T_{\gamma 6}$) 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-DpHEMT 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.

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 отпираания 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 запираания 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 локализирующих 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 $0,7 \text{ А/мм}$).

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°C), 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°C):

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°C) 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 мезоструктур 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

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 $T = 300$ К продемонстрировали холловскую подвижность электронов $\mu = 5300$ см²/(В·с), поверхностную плотность $n_s = 4 \cdot 10^{12}$ 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 специфичной реакции Sh-i-p-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 $0,8$ мкм 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 мм, 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.

ГЛАВА 1. УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНЫХ СЕРИЙНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ *n*- GaAs

1.1. Особенности экспериментально наблюдаемых характеристик транзисторов и пути их улучшения

Известно, что на характеристики полевых транзисторов кроме выбора оптимальной топологии конструкции и технологии изготовления сильное влияние оказывают свойства и качество исходной эпитаксиальной структуры, такие как подвижность и скорость насыщения электронов, концентрация носителей заряда, ширина запрещенной зоны, разрыв зон на границе гетеропереходов и т.д.

Характеристики полевых транзисторов и их воспроизводимость определяется не только основными свойствами структуры. Часто отрицательно сказывается наличие в структуре глубоких уровней на поверхности, в активном и буферном слоях и на границах гетеропереходов [1-2]. С ними связывают гистерезис на вольт - амперных характеристиках (ВАХ), чувствительность к освещению, температурные нестабильности и многие другие эффекты.

Глубокие уровни на границе гетероперехода могут приводить как к отсутствию перекрытия канала полевых транзисторов даже при очень больших отрицательных напряжениях на затворе [3,4], так и к аномальному виду их вольт-амперных характеристик [5]. Глубокие уровни в буферном слое и, по-видимому, связанное с ними падение подвижности электронов на границе буферного и активного слоя [6] влияют на шумовые и усилительные характеристики ПТШ, его коэффициент шума [7]. Кроме того, глубокие уровни заметно уменьшают выходную мощность транзисторов [8-12], изменяют крутизну g_m и максимальную частоту усиления по току f_t прибора [13], приводят к резкому падению коэффициента усиления и росту коэффициента шума при импульсных воздействиях [14].

Круг физических эффектов, связанных с глубокими энергетическими уровнями – огромен и всегда большой интерес представляют любые экспериментальные и теоретические исследования в этой области, особенно

связанные с практическими результатами. В частности одним из эффектов, ограничивающих выход годных арсенид-галлиевых полевых транзисторов с барьером Шоттки (ПТШ), является изменение параметров во времени [15–17] и возникновение вследствие этого низкочастотных шумов в диапазоне 0,1 –10 кГц [18]. Этот эффект, имеющий место в ПТШ с буферным слоем [19,21,22], связывают с наличием глубоких уровней в слое канала из *n-GaAs* [19–21], с процессами, происходящими на границе раздела канал – подложка [15–17, 20], либо с влиянием уровней поверхностных состояний [15–17]. Следует отметить, что изменение параметров ПТШ во времени, приводящие к изменению вида ВАХ [16] и величины тока, протекающего по каналу [19], возникает в сильных электрических полях, при которых под затвором либо у стока транзистора [16, 23] возникают статические домены. В [24] показано, что в структурах «*n-GaAs* канал – *SI-GaAs* подложка» статические домены инициируют появление эффектов, обусловленных проникновением электронов через барьер канал–подложка и захватом их на глубокие уровни в подложке, что приводит к дрейфу параметров диодов Ганна во времени. На момент появления [24] в работах, посвященных исследованию дрейфа параметров полевых транзисторов во времени, процессы, происходящие в статических доменах, не учитывались.

Потребности интегральной электроники способствовали созданию оптически управляемых арсенидгаллиевых полевых транзисторов и фоторезисторов. На основе этих приборов разработаны высокочувствительные интегральные СВЧ-усилители, генераторы, модуляторы и т. д., управляемые светом [25,26]. Однако механизм фоточувствительности этих приборов не был окончательно установлен. Были предложены различные модели, основанные на представлении о том, что изменение тока через прибор в условиях подсветки определяется не изменением концентрации носителей в канале, а модуляцией толщины канала. Рассматриваемые причины фотомодуляции толщины канала разнообразны – это разделение носителей на барьере Шоттки [26], на поверхностном барьере [27] либо модуляция слоя обеднения *n-i*-перехода канал – подложка за счет оптической генерации носителей с глубоких центров [28]. Во

всех работах, за исключением [29], модуляция канала под действием света рассматривалась вне всякой связи с внешним электрическим полем в канале. В то же время хорошо известно, что для рассматриваемых структур явления переноса в значительной мере определяются эффектами сильных электрических полей. Например, насыщение вольт-амперных характеристик (ВАХ) связано с возникновением статического домена [30].

В данной главе будут представлены результаты измерений характеристик образцов полевых транзисторов ФГУП НПП “ИСТОК” с глубокими уровнями, экспериментально изучено влияние процессов, происходящих в статических доменах, в частности, эффектов захвата электронов на изменение во времени параметров ПТШ [31], экспериментально исследовано влияние сильных электрических полей на фоточувствительность арсенидгаллиевых приборов [32].

Естественно, исследование физических эффектов, связанных с глубокими уровнями, важно в части практических приложений. Наибольший практический интерес представляет поиск путей уменьшения влияния глубоких энергетических состояний на характеристики полевых транзисторов и конструктивно-технологических решений, в которых приняты специальные меры по устранению причин формирования глубоких уровней. В работе [33] было показано, как достаточно простым способом можно сильно ослабить влияние глубоких уровней в буферном слое на характеристики транзисторов, при этом сильно уменьшить токи утечки по буферному слою при коротких затворах.

1.1.1. Влияние глубоких уровней на характеристики полевых транзисторов

Всегда считается, что в «идеальной» полупроводниковой структуре подвижность электронов растет при уменьшении концентрации легирующей примеси. Поэтому, на первый взгляд, очевидно, что в буферном слое транзистора, где концентрация доноров менее 10^{16} см^{-3} , подвижность электронов должна быть существенно выше, чем в активном с концентрацией доноров $N_D > 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Однако эксперимент показывает, что это не всегда так. На рисунке 1-1 приведены типичные зависимости распределения концентрации электронов $n(y)$ и их подвижности $\mu(y)$ по толщине слоя n-GaAs, выращенного методом МОС-гидридной эпитаксии. Результаты получены с использованием тестовых структур типа "клеверный лист" методом Ван-дер-Пау в сочетании с послойным химическим травлением. Видно, что в переходной области активный – буферный слой реальных транзисторных структур, несмотря на более низкую концентрацию примесей, подвижность электронов может быть намного ниже, чем в активном слое, хотя иногда встречаются структуры с подвижностью в переходной области более высокой, чем в активном слое. Это говорит о большом скоплении дефектов в этой области.

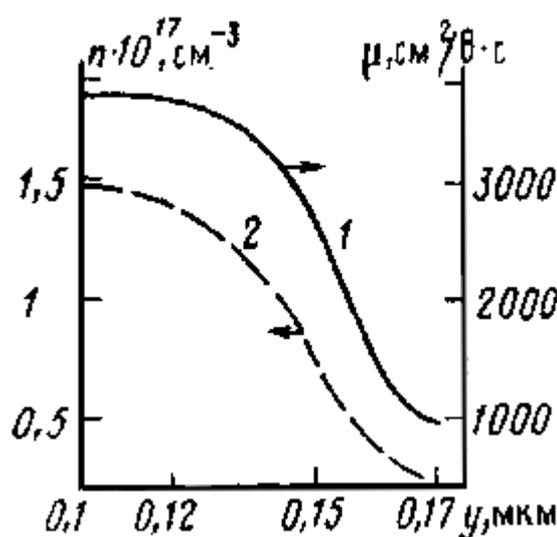


Рис. 1-1. Зависимость подвижности (1) и концентрации (2) электронов от расстояния до поверхности слоя n-GaAs.

Считается, что во многом свойства полевых транзисторов на основе GaAs/Al_xGa_{1-x}As гетероструктур с селективным легированием (ГСЛ) определяются глубокими уровнями в тройном соединении и на границе гетероперехода. Принято считать, что в n-Al_xGa_{1-x}As глубокие уровни создаются так называемыми DX-центрами, природа которых, по-видимому, окончательно не установлена [2, 34]. Наиболее признана точка зрения, согласно которой DX-центры вообще присущи объемно-легированному донорами слою Al_xGa_{1-x}As с достаточно большим содержанием Al ($x \geq 0.4$), и их концентрация не может быть произвольно уменьшена без уменьшения концентрации доноров или мольной доли алюминия в таком соединении [35]. Это рождает проблему ограничения возможности применения легированного донорами буферного слоя Al_xGa_{1-x}As с большим содержанием Al, на котором формируется слой *n*-GaAs канала. С одной стороны, такой буфер существенно препятствует миграции дефектов из подложки к слою канала, с другой - сам может служить источником дефектов.

Рассмотрим ряд особенностей ВАХ полевых транзисторов на селективно легированных гетероструктурах (ГСЛ) с глубокими уровнями.

Экспериментальные образцы полевых транзисторов формировались по технологии, подробно описанной в работе [36], на основе Al_xGa_{1-x}As/GaAs гетероструктур при $x = 0.23 \div 0.25$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке "Цна". Типичная ГСЛ содержала: p-GaAs буфер толщиной $0,8 \div 1$ мкм с фоновой концентрацией остаточных акцепторов $(10^{14} \div 10^{15}) \text{ см}^{-3}$, выращенный на полуизолирующей подложке; нелегируемый слой Al_xGa_{1-x}As спейсера толщиной 3 нм; нелегируемый GaAs слой канала; слой Al_xGa_{1-x}As толщиной $30 \div 38$ нм (с концентрацией доноров $(7 \div 9) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$); слой для омических контактов *n*⁺-GaAs с концентрацией доноров $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Некоторые из структур содержали тонкий (~ 20 нм) слой p-GaAs между *n*⁺-GaAs и *n*⁺-Al_xGa_{1-x}As, что упрощало технологию вскрытия слоя канала под затвором методом травления, и (или) буфер на Al_xGa_{1-x}As/GaAs сверхрешетке. Однако эти особенности не влияли на исследуемые эффекты.

Интегральная подвижность электронов в структуре достигала $(4\div 5,8) \cdot 10^3$ $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при температуре $T = 300$ К и $(5\div 8) \cdot 10^3$ $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при $T = 77$ К. Соответствующие значения поверхностной плотности электронов составляли $(1\div 1,5) \cdot 10^{12}$ см^{-2} и $(0,8\div 1) \cdot 10^{12}$ см^{-2} . Затвор длиной $(0,8\div 1)$ мкм формировался с использованием ультрафиолетовой литографии в предварительно вскрытых областях после травли верхнего слоя GaAs до заданной (достаточно малой) толщины. Исследование ВАХ полевых транзисторов на основе ГСЛ показало, что у всех приборов, изготовленных на некоторых из структур или у группы транзисторов, образующих на поверхности структуры локальную область достаточно больших размеров, ВАХ могут иметь вид, представленный на рисунке 1-2 а-в. Для них характерно отсутствие полного перекрытия канала и плохое управление током (малая крутизна). Корреляция между видом ВАХ и электрофизическими параметрами ГСЛ не отмечалась. Подобные ВАХ наблюдались, в том числе и у транзисторов, сформированных на ГСЛ с достаточно выраженными осцилляциями Шубникова-де-Гааза, высокими значениями подвижности и поверхностной плотности электронов. Наблюдаемые эффекты нельзя связать с утечкой тока по подложке, т.к. ток между отдельными мезаструктурами пренебрежимо мал.

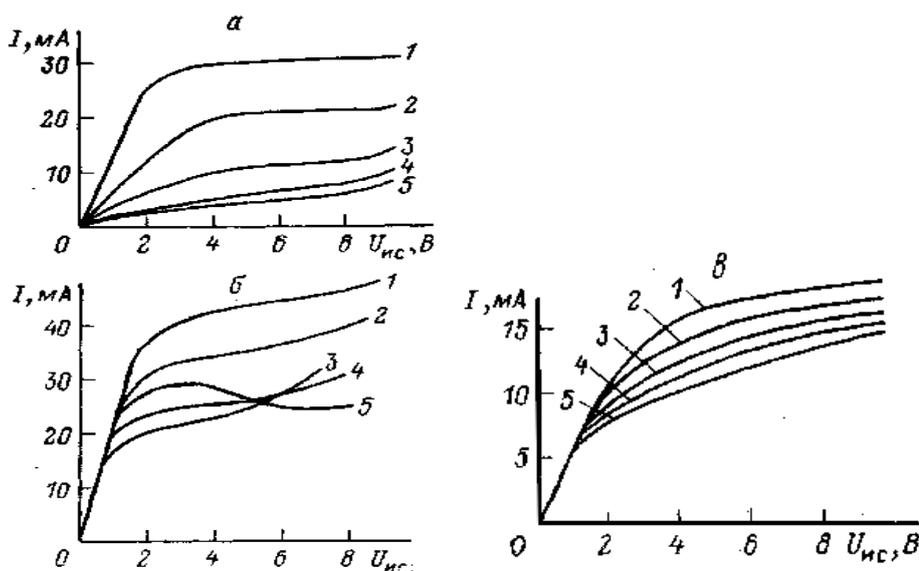


Рис. 1-2. Типичные вольт-амперные характеристики полевых транзисторов на некоторых гетероструктурах. Напряжение на затворе $U_{из}$, В: 1 – 0, 2 – 0.5, 3 – 1, 4 – 1.5, 5 – 2.

Объяснение наблюдаемых закономерностей, на наш взгляд, лежит в самом принципе управления током полевого транзистора на ГСЛ, если в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ или на границе гетероперехода $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ присутствуют глубокие уровни. Действительно, если глубоких уровней нет, то увеличение отрицательного напряжения на затворе "поднимает" край зоны проводимости в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ относительно дна потенциальной ямы. При этом яма расширяется и "мелеет", уровень Ферми опускается, а поверхностная плотность электронов в яме уменьшается. За счет этого уменьшается и ток между истоком и стоком. В присутствии глубоких уровней "подъем" края зоны проводимости $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ приводит к тому, что во все большей части этого материала глубокие уровни оказываются выше уровня Ферми, т.е. все большее число уровней приобретает заряд, знак которого соответствует типу уровня. Это вызывает дополнительный приток электронов в канал, препятствуя его обеднению. Сходная ситуация имеет место и в том случае, когда глубокие уровни расположены на границе гетероперехода, в этом случае понижение уровня Ферми приводит к их ионизации. Сходная ситуация наблюдается при ионизации глубоких уровней в продольном поле и (или) их ударной ионизации.

Прямое подтверждение этим предположениям получено в [37] при исследовании ПТГСЛ с различными видами ВАХ методом емкостной спектроскопии глубоких уровней. Предварительно контролировалась зависимость емкости и тангенса угла потерь барьера Шоттки от величины обратного напряжения смещения $U_{\text{из}}$. Для измерения спектра глубоких уровней выбирался диапазон значений $U_{\text{из}}$, в котором влиянием сопротивления необедненной части канала можно пренебречь.

Типичный спектр глубоких уровней представлен на рисунке 1-3. Он состоит 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 [38].

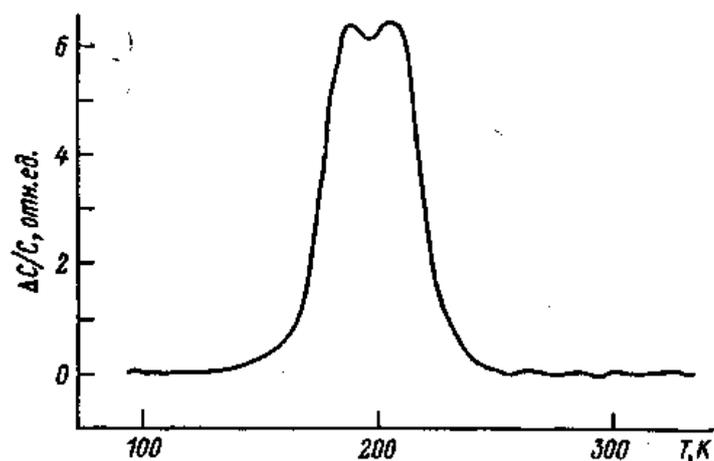


Рис. 1-3. Типичный спектр глубоких уровней, измеренный методом емкостной спектроскопии.

В структурах некоторых полевых транзисторов обнаружен также уровень с энергией ионизации 0,25 эВ и концентрацией $(0,5 \div 1) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Однако его присутствие не коррелировало с особенностями ВАХ транзисторов.

Иная ситуация имела место с DX-центрами. Их концентрация в образцах различных транзисторов изменялась от $2 \cdot 10^{16}$ до 10^{18} см^{-3} , что связано с различиями в величине концентрации доноров. Причем с ростом концентрации наблюдались искажения формы ВАХ – увеличивался ток канала при постоянном напряжении на затворе, крутизна падала, а перекрытие канала ухудшалось.

Для анализа пространственного распределения глубоких уровней в ГСЛ их спектры измерялись при фиксированной величине $U_{из}$ и различных значениях напряжения импульсов заполнения. С ростом напряжения этих импульсов амплитуда пиков спектра насыщалась, что свидетельствовало о локализации DX-центров вблизи границы раздела гетероперехода.

1.1.2. Эффекты сильного поля и дрейф параметров в полевых транзисторах

Эксперименты проводились на стандартных однозатворных и двухзатворных ПТШ, с *n*-GaAs активным слоем, образующим барьер Шоттки и слой канала при концентрации электронов в активном слое $n_0 = (1 \div 2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, подвижности $\mu = (3 \div 4.5) \cdot 10^3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, толщине активного слоя $d = 0.2 \text{ мкм}$, выращенных на подложке *SI-GaAs*, легированной хромом с удельным сопротивлением $\rho > 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Между слоем канала и подложкой выращивался нелегируемый буферный слой ($n \leq 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) толщиной 1–3 мкм. ПТШ монтировались в 50-омную резистивную полосковую линию. Ток через прибор измерялся на 4-омном сопротивлении, включенном последовательно с истоком. На сток и затвор одновременно подавались либо одиночные импульсы напряжения длительностью $10^{-8} - 10^{-5} \text{ с}$, либо серии импульсов с частотой следования 0,1–10 Гц. Частота следования импульсов выбиралась низкой, чтобы в промежутках между импульсами захваченные носители успевали полностью уйти с центров захвата. Для регистрации эффектов захвата, возникающих в ПТШ, на сток подавался второй импульс слабого поля с амплитудой, лежащей на омическом участке вольт-амперной характеристики (экспериментально не более 0,5 В); промежуток между импульсами был меньше времени релаксации связанного заряда.

На рисунке 4(а) приведены типичные вольт-амперные характеристики ПТШ, снятые при разных напряжениях на затворе, а на рисунке 4,б – соответствующие зависимости тока второго импульса, протекающего через транзистор, от напряжения на первом.

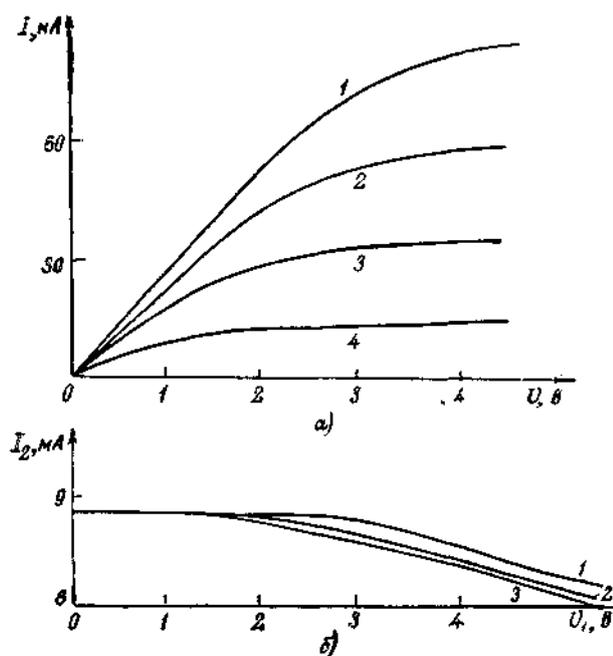


Рис. 4. ВАХ полевого транзистора (а) и зависимость тока I_2 второго импульса от напряжения U_1 на первом, снятые при напряжениях на затворе $U_3=0$ (1), $U_3=-1$ В (2), $U_3=-2$ В (3), $U_3=-3$ В (4) (б).

Видно, что при напряжениях, при которых происходит насыщение ВАХ ПТШ, обусловленное формированием статического домена [15], наблюдается уменьшение тока второго импульса, что связано с увеличением низкополевого сопротивления канала. Характерно, что с увеличением напряжения на затворе эти эффекты проявляются при меньших напряжениях на стоке, что связано с уменьшением порогового потенциала на стоке возникновения статического домена.

Данный эксперимент показывает, что при возникновении статического домена в канале полевого транзистора появляются эффекты захвата свободных носителей, приводящие к модуляции сопротивления транзистора. Механизм модуляции сопротивления канала, очевидно, связан (аналогично [24]) с тем, что в области статического домена, в отличие от других областей ПТШ, имеется заметное количество электронов с энергией, достаточной для преодоления барьера, возникающего на границах раздела n -GaAs канал – буферный слой и буферный слой – подложка. Такие электроны приобретают энергию и дрейфовый

импульс в продольном поле, направленном вдоль слоя канала при упругом рассеянии с учетом дополнительных компонент энергии и дрейфового импульса, приобретаемых в краевом поле статического домена, направленном нормально к подложке. Переход электронов через барьер и последующий их захват на уровни происходит только при достаточно сильном разогреве электронов в слое канала. Этот же разогрев приводит и к формированию статического домена. Появление дополнительного, по отношению к равновесному состоянию, отрицательного заряда в области, имеющей свободные центры захвата (в буферном слое или в подложке), приводит к наводке в канале компенсирующего его положительного заряда, обусловленного ионизированными донорами, т. е. к локальному сужению проводящего канала. Этот эффект и наблюдается как увеличение низкополевого сопротивления канала, измеряемого на втором импульсе. Эффект захвата на глубокие уровни связан с состояниями на границе раздела слой канала – буферный слой и буферный слой – подложка, а не с поверхностными состояниями [15–17]. Об этом свидетельствуют эксперименты, аналогичные приведенным в работе [24]: подача отрицательного смещения на подложку приводит к ослаблению процессов захвата. Так как сопротивление подложки (толщиной 150 мкм) значительно больше сопротивления буферного слоя, то отрицательное напряжение в основном приложено к подложке и сильнее модулирует переход буферный слой – подложка, чем переход пленка – буферный слой, что препятствует проникновению электронов в область со свободными центрами захвата. Исходя из этих результатов, можно предположить, что электроны в статическом домене сильного поля получают энергию, достаточную не только для преодоления барьера пленка – буферный слой, но и для пролета по буферному слою и через барьер буферный слой – подложка. В пользу данного предположения свидетельствует тот факт, что процессы, происходящие как в структурах с буферным слоем, так и без него качественно аналогичны, хотя буферный слой несколько ослабляет величину модуляции канала (Этот эффект может быть связан также с разной величиной статического домена в ПТШ и в диодах, исследованных в [24].). Кроме того, в буферном слое концентрация

свободных носителей заряда весьма велика ($\sim 10^{14}$ см⁻³) и, следовательно, уровни, которые в соответствии с [39] являются центрами захвата, должны быть заполнены. Тем не менее, влияние буферного слоя на генерацию центров захвата в ПТШ нуждается в постоянном контроле.

Рассмотрим теперь, каким образом эффекты захвата приводят к дрейфу параметров ПТШ, который проявляется в виде зависимости крутизны и тока насыщения ВАХ от частоты следования импульсов (так называемая частотная дисперсия ВАХ).

Ясно, что в течение длительности импульса на затворе ПТШ вследствие возникновения статического домена развиваются процессы захвата, приводящие к локальной модуляции толщины канала под затвором. Хотя, как видно на рис. 4(б), изменение сопротивления канала невелико, но при высокой частоте следования импульсов (когда в промежутках между ними захваченные носители не успевают релаксировать) новый статический домен возникает в пространственно-неоднородном канале. В силу нелинейной зависимости поля статического домена от неоднородности, это приводит к сильному изменению тока насыщения ПТШ. При подаче импульсов ток, текущий через канал, изменяется до тех пор, пока не установится динамическое равновесие между процессами захвата, происходящими в течение длительности импульса, и процессами освобождения, происходящими в промежутках между импульсами. Достаточно длительный процесс установления этого динамического равновесия и будет причиной дрейфа параметров ПТШ во времени.

По мере роста частоты следования импульсов f происходит все более заметная модуляция толщины канала из-за накопления на центрах захваченных носителей заряда, не успевающих релаксировать в промежутках между импульсами, что приводит к еще большему ограничению тока, протекающего через прибор, т. е. к появлению частотной дисперсии ВАХ.

На рисунке 1-5 приведены зависимости тока насыщения ПТШ (напряжение сток–исток равно 4 В, длительность импульсов – 0,2 мкс) от f , снятые при разных напряжениях на затворе. Как видно, с увеличением частоты f ток насыщения ВАХ

ПТШ уменьшается почти в два раза. Так как времена релаксации захваченных носителей в приборах, изготовленных на разных эпитаксиальных структурах, отличаются на несколько порядков (экспериментально наблюдались времена дрейфа параметров от 10^{-3} до 1 с), то и характер зависимости тока насыщения от частоты следования импульсов различен. При этом для всех приборов характерно отсутствие частотной дисперсии на линейном участке ВАХ. Таким образом, процессы развития эффектов захвата именно в области статического домена ответственны за частотную дисперсию и временной дрейф параметров ПТШ.

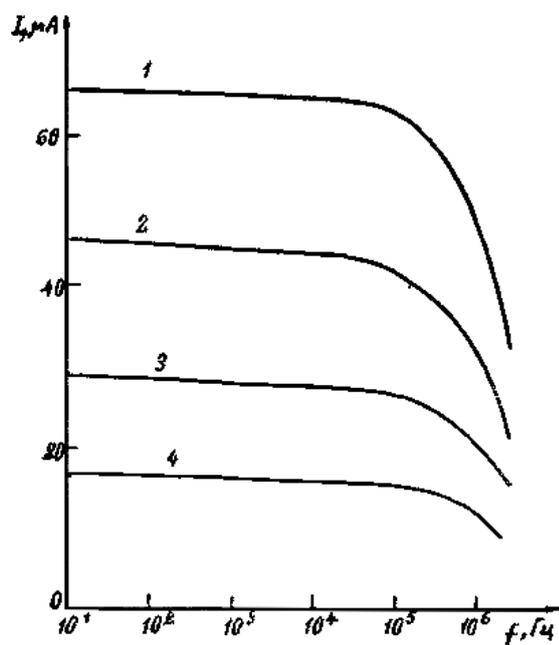


Рис. 1-5. Зависимость тока насыщения ПТШ от частоты следования импульсов, снятые при напряжениях на затворе $U_3=0$ (1), $U_3=-1$ В (2), $U_3=-2$ В (3), $U_3=-3$ В (4).

Мы полагаем, что как и в [15], механизмы, приводящие к деградации параметров полевых транзисторов, не зависят от режима его работы (статический, импульсный или СВЧ-режим). Для того чтобы показать, что механизм дрейфа параметров ПТШ при его работе в СВЧ-цепи аналогичен описанному выше, на затвор подавались импульсы отрицательного напряжения с частотой 1 ГГц и

длительностью 10 мкс, сдвинутые относительно импульсного напряжения, подаваемого на сток (смотри рисунок 1-6) при нулевом потенциале на истоке.

При отсутствии сигнала на затворе форма импульса тока, протекающего через прибор (рисунок 1-6, кривая 2), соответствовала форме импульса напряжения, подаваемого на сток (амплитуда импульса равна 2 В и соответствует линейному участку ВАХ).

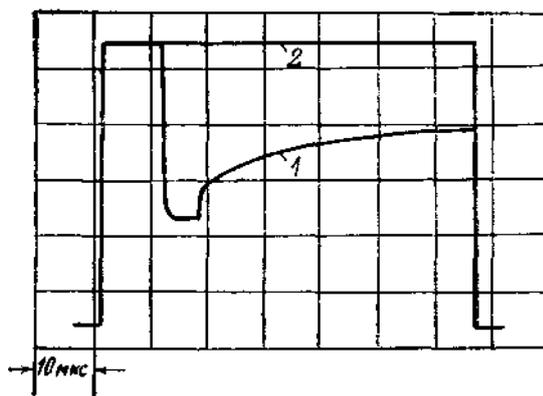


Рис. 1-6. Осциллограмма тока, протекающего через ПТШ при наличии (1) и отсутствии (2) импульсов с частотой 1 Гц.

При подаче отрицательного потенциала на затвор (рисунок 1-6, кривая 1) ток стока, текущий через прибор, уменьшался, а после прекращения подачи отрицательного потенциала на затвор ток стока медленно релаксировал к стационарному значению. При уменьшении мощности СВЧ-сигнала временной дрейф тока стока исчезал, что связано с работой на линейном участке ВАХ. Необходимо отметить, что аналогичные зависимости изменения тока, текущего через слои структуры *n*-GaAs канал – буферный слой – полуизолирующая подложка, получены и в работе [19] при воздействии на структуру СВЧ-сигналом с частотой 9,4 ГГц.

Таким образом, временной дрейф параметров ПТШ при работе в СВЧ-цепи также связан с формированием в канале прибора статического домена, в котором развиваются эффекты захвата, приводящие к локальной модуляции толщины канала.

1.1.3. Фоточувствительность арсенид-галлиевых полевых транзисторов в сильных электрических полях

Эксперименты проводились на образцах полевых транзисторов с контактом Шоттки в затворе (ПТШ) (расстояние «сток–исток» – 3 мкм, длина основания затвора – 1 мкм), изготовленных на основе эпитаксиальных структур *n*-GaAs (с концентрацией электронов $n=(1\div 2)\cdot 10^{17}$ см⁻³ и с толщиной эпитаксиального слоя $d=0.2\div 0.3$ мкм), выращенных на *SI-GaAs* подложке, легированной Cr. Исследовались структуры как с буферным слоем ($n\cong 1\cdot 10^{14}$ см⁻³, $d=1\div 2$ мкм), так и без него. Чтобы избежать влияния переходных процессов, измерения проводились на постоянном токе. Освещение структур осуществлялось от лампы накаливания через фильтры, пропускающие свет с энергией квантов 1,1 ... 0,75 эВ. Выбор подсветки в этом диапазоне энергий квантов обусловлен следующим.

1). Свет с энергией квантов, меньшей ширины запрещенной зоны GaAs, не вызывает генерации электронно-дырочных пар, разделение которых на трех основных потенциальных барьерах в ПТШ: барьер Шоттки, эпитаксиальный слой – буферный слой (или подложка), эпитаксиальный слой – поверхностные состояния значительно усложняет интерпретацию полученных результатов.

2). Выбранный спектральный диапазон светового излучения возбуждает носители с глубоких уровней либо на поверхности, либо в объеме эпитаксиального слоя, что приводит к изменению ширины упомянутых выше переходов и к модуляции толщины канала. Вкладом генерации носителей в слое канала можно пренебречь из-за высокой концентрации свободных электронов.

3). В работах [22,29,40] при освещении структур светом выбранного диапазона длин волн наблюдается только отрицательная фотопроводимость, что связывается с генерацией дырок с примесных уровней. Этот эффект может представлять интерес при создании оптоэлектронных СВЧ-приборов.

Первоначально выделялся переход, модуляция которого под действием света вносит наибольший вклад в фоточувствительность исследуемых структур. Поскольку подсветка исключала влияние барьера Шоттки, предстояло сделать

выбор между поверхностным барьером и $n-i$ -переходом на границе слоя канала с подложкой. С этой целью снималась зависимость отношения фототока ΔI_Φ к темновому току I_T от напряжения на затворе. Измерения проводились на структурах без буферного слоя. Напряжение сток–исток находилось на линейном участке ВАХ в области слабых полей, поэтому домен сильного поля в образце заведомо отсутствовал. На рисунке 1-7 приведена эта зависимость, демонстрирующая экспоненциальный рост фототока с увеличением напряжения на затворе.

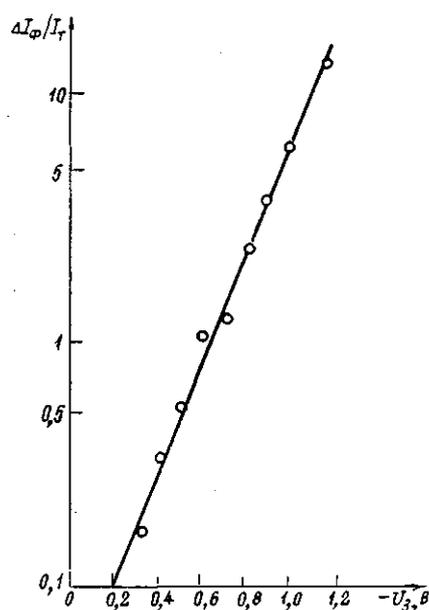


Рис. 1-7. Зависимость относительного фототока $\Delta I_\Phi / I_T$ от напряжения U_3 на затворе ПТШ.

Такую зависимость не может дать модуляция поверхностного барьера, происходящая в области вне затвора. Поэтому был сделан вывод об определяющей роли $(n-i)$ - перехода эпитаксиальный слой – подложка в фоточувствительность исследуемых структур. Положительная фотопроводимость, наблюдавшаяся в слабых полях, свидетельствовала о генерации только электронов (а не дырок, как в [22, 40]) с глубоких уровней в подложке.

Для всех исследованных ПТШ, изготовленных на структурах с буферным слоем, также характерна в той или иной мере фоточувствительность, однако величина фототока в них меньше, чем в структурах без буферного слоя. Поэтому

можно предположить, что определяющую роль в фоточувствительности таких приборов играет $(n-i)$ - переход буферный слой–подложка. Причем, очевидно, толщина буферного слоя в исследованных нами образцах недостаточна для того, чтобы экранировать влияние $(n-i)$ - перехода. В пользу этого предположения свидетельствуют и результаты работы [41], в которой показано, что с увеличением толщины буферного слоя уменьшается фоточувствительность ПТШ.

Приведенные данные свидетельствуют об определяющей роли $(n-i)$ - перехода в механизме фоточувствительности образцов ПТШ такого типа.

Для выяснения влияния сильных электрических полей на фоточувствительность арсенид-галлиевых приборов снимались ВАХ в темноте и при освещении. Характерные виды ВАХ приведены на рисунке 1-8. Как видно, в области слабых полей на линейном участке ВАХ наблюдается положительная величина относительной фотопроводимости. На сублинейном участке и на участке насыщения ВАХ знак величины относительной фотопроводимости изменяется - она становится отрицательной, причем с увеличением напряжения на затворе участок, на котором проявляется отрицательная фотопроводимость, смещается в область меньших значений напряжений сток–исток.

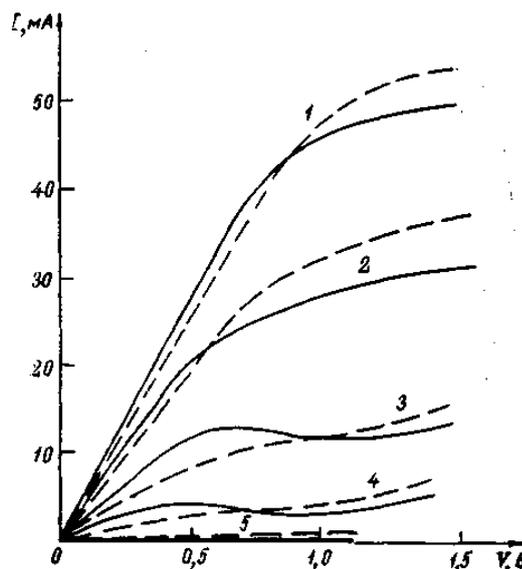


Рис. 1-8. ВАХ ПТШ, снятые в темноте (сплошные кривые), и при подсветке (пунктир) при напряжениях на затворе $U_3 = 0 \text{ В}$ (1), $U_3 = -0,5 \text{ В}$ (2), $U_3 = -1 \text{ В}$ (3), $U_3 = -1,5 \text{ В}$ (4); $U_3 = -2 \text{ В}$ (5).

Таким образом, знак фотопроводимости зависит не столько от типа центров на границах раздела, как предполагается в работах [22, 40], сколько от величины поля в слое канала.

По виду ВАХ (смотри рисунок 1-8) можно предположить, что смена знака величины относительной фотопроводимости связана с формированием в слое канала образца домена сильного электрического поля.

Поскольку непосредственные измерения распределения поля в ПТШ невозможны, измерения фотоотклика совместно с измерениями распределения потенциала были проведены на модельных структурах – длинных планарных диодах (300 мкм) с толщиной эпитаксиального слоя менее 5 мкм и с концентрацией свободных носителей $n_0 = (1 \div 5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Сужение канала под затвором в таких структурах моделировалось геометрической неоднородностью в активной области диода. Использовались структуры с меньшей концентрацией свободных носителей в легированном слое (по сравнению с величиной концентрации электронов в канале полевых транзисторов) для того, чтобы в сильных полях поле статического домена, формирующегося на неоднородности, не вызывало развития в домене процесса ударной ионизации.

Выбор для исследований таких структур позволил, с одной стороны, промоделировать процессы, происходящие в канале ПТШ - в силу аналогичного распределения поля, а с другой – непосредственно измерить распределение потенциала. На рисунке 1-9а представлены ВАХ исследуемых структур, снятые на постоянном токе, которые аналогичны ВАХ ПТШ (рисунок 1-8).

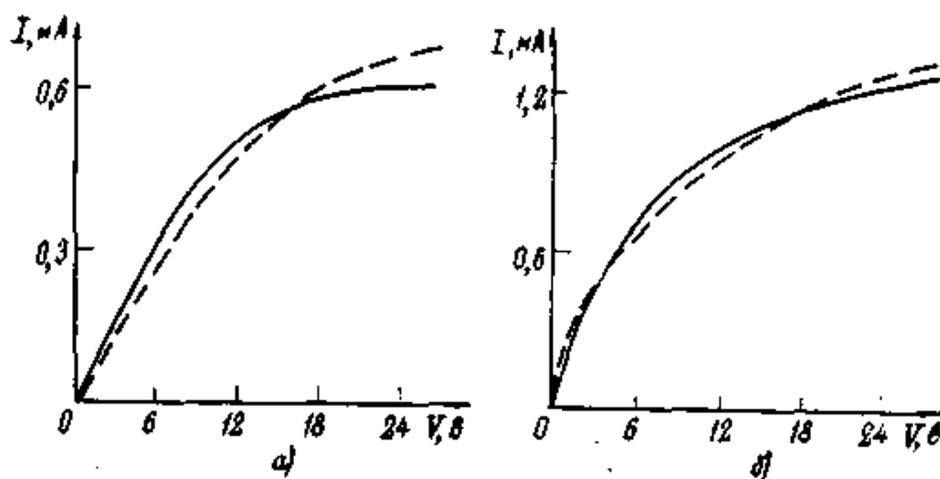


Рис. 1-9. ВАХ планарных диодов с подсветкой (пунктир) и без подсветки (сплошная линия).

Противоречат наши результаты и модели [29], где отрицательная фотопроводимость трактуется аналогично работам [22,40], а переход от отрицательной фотопроводимости к положительной с повышением напряжения на затворе ПТШ объясняется оптически стимулированной полевой эмиссией электронов. Мы полагаем, что подсветка с энергией квантов (1,1 ... 0,75 эВ) вызывает эмиссию электронов (а не дырок, как полагают авторы [22,29,40], наблюдавшие только отрицательную фотопроводимость) с ловушек, расположенных на нижней границе легированного донорами эпитаксиального слоя канала. Это приводит к сужению $n-i$ -перехода, а, следовательно, к расширению канала и появлению в слабых полях положительной фотопроводимости.

Отрицательная фотопроводимость в области сильных полей связана с формированием в образце статического домена, на что указывают результаты зондовых измерений распределения потенциала вдоль эпитаксиального слоя (рисунок 1-10). Измерения проводились точечным гальваническим зондом с разрешением 5 мкм. В области статического домена расширение канала в результате освещения происходит по-иному, чем в остальной части образца, так как вследствие проникновения в нее избыточных электронов из статического домена меняется заполнение глубоких уровней [24].

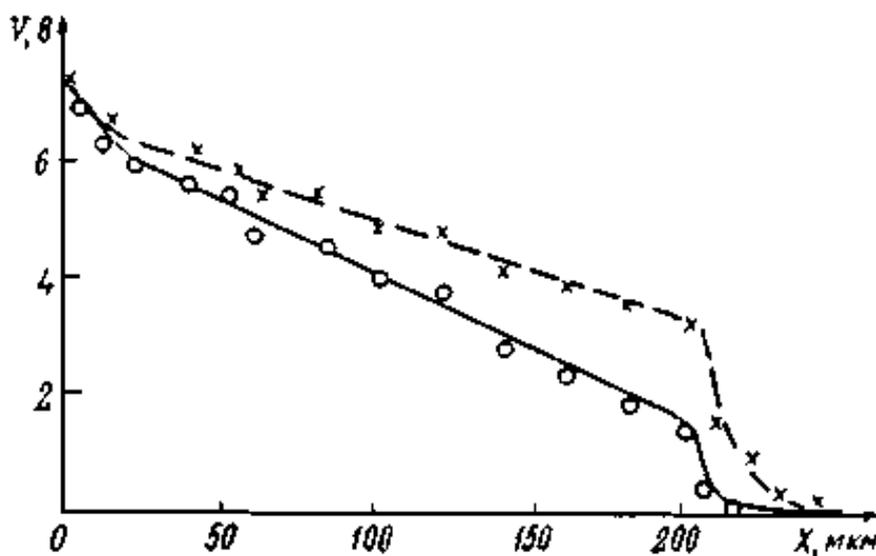


Рис. 1-10. Распределение потенциала по длине образца в темноте (сплошная линия) и при световом воздействии (пунктир). Напряжение на образце соответствует участку с отрицательной фотопроводимостью.

Поэтому при умеренных напряжениях на образце (пока выбранная рабочая точка на ВАХ далека от участка ее насыщения и существенна зависимость тока, протекающего через образец, от напряжения на домене) неравномерность расширения канала, вызванная подсветкой, разрушает сформировавшееся в темноте динамическое равновесное состояние между доменом и остальной частью образца. Это приводит к перераспределению напряжения, и новое состояние равновесия устанавливается при меньшем значении поля вне статического домена, а, следовательно, при пониженном значении тока, что хорошо видно на рисунке 1-10.

В противоположность этой ситуации, при высоких напряжениях на образце (на участке насыщения ВАХ) ток уже не зависит от напряжения на домене. Поэтому перераспределение напряжения на образце не может привести к падению тока и оставшийся без противодействия механизм увеличения тока (эффект расширения канала) приводит к положительной фотопроводимости.

Аналогичное изменение знака фотопроводимости в зависимости от величины поля в статическом домене наблюдается и при освещении данных

структур светом с энергией, равной ширине запрещенной зоны GaAs, в отличие от данных [22,29,40], в которых наблюдалась только положительная фотопроводимость.

Таким образом, получены следующие основные результаты:

1. Особенности поведения фотопроводимости исследованных структур обусловлены модуляцией толщины $n-i$ -перехода.

2. Характер фоточувствительности исследованных образцов определяется не столько видом глубоких центров, возбуждаемых световым воздействием, сколько процессами формирования области сильного поля и перераспределения напряжения между ней и остальной частью прибора.

3. Хорошим способом подавления влияния глубоких центров на характеристики ПТШ является формирование на подложке такой конструкции буферного слоя и выбор режимов его роста, при которых концентрация глубоких центров сильно уменьшается в направлении роста к слою канала.

4. Приведены примеры характеристик полевых транзисторов с глубокими уровнями. Экспериментально продемонстрировано ослабление корреляции между видом ВАХ и «паспортными» электрофизическими параметрами ГСЛ при наличии в структуре большого количества глубоких центров. Аномалии ВАХ наблюдались, в том числе и у транзисторов, сформированных на ГСЛ с достаточно выраженными осцилляциями Шубникова-де Гааза, высокими значениями подвижности и поверхностной плотности электронов.

5. Представлены результаты исследования спектров глубоких уровней методом емкостной спектроскопии. Он хорошо согласуется с энергиями ионизации DX-центра в слое $Al_xGa_{1-x}As$, легированном кремнием. В структурах некоторых ПТШ обнаружен также уровень с энергией ионизации 0,25 эВ.

6. Экспериментально изучены процессы захвата, возникающие в GaAs полевых транзисторах с барьером Шоттки. Показано, что в сильных электрических полях, при которых под затвором формируется статический домен, вследствие проникновения горячих электронов в область со свободными центрами захвата (локализованными либо в буферном слое, либо в подложке)

происходит локальная модуляция толщины канала транзистора. Этот эффект приводит к появлению зависимости крутизны и тока насыщения ВАХ от частоты и длительности переменного сигнала, что является причиной временного дрейфа параметров приборов. Установлено, что механизм дрейфа параметров транзистора как при работе на импульсах, так и в СВЧ-цепи обусловлен аналогичными причинами.

7. Представлены экспериментальные результаты по исследованию фоточувствительности GaAs полевых транзисторов в сильных электрических полях. Приведены данные, свидетельствующие об определяющей роли $n-i$ -перехода между эпитаксиальным слоем канала и буферным слоем (или подложкой). Установлено наличие трех областей с разным знаком величины относительной фотопроводимости. Показано, что характер токового фотоотклика экспериментальных образцов 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.

1.2. Улучшение качества контактов и уменьшение влияния дефектов на характеристики элементов конструкции транзисторных структур

Одной из основных проблем в создании активных элементов интегральных схем на полевых транзисторах с барьером Шоттки является повышение воспроизводимости их характеристик. Важнейшие факторы, определяющие качество полевых транзисторов – сопротивление и качество контактов, чувствительность эпитаксиальной структуры к дефектам слоев [41,42]. В частности, для затворного электрода крайне важно не только его омическое сопротивление, но и однородность характеристик контакта Шоттки по его площади, т.е. качество конструкции и технологии контактов Шоттки. Так при развитой периферии мощного транзистора появление практически незаметных дефектов, таких как локальные области с увеличенной напряженностью встроенного электрического поля (например, на стоковых и истоковых границах основания затвора) или с большей плотностью поверхностных состояний, может приводить к уменьшению пробивных напряжений. При этом часто из-за большого отношения ширины затвора к размерам дефекта, появление лавинного тока может быстро стимулировать развитие необратимого теплового пробоя. Причиной появления таких дефектов могут быть различные вещества, оставшиеся на поверхности после процесса удаления. Например, известно, что после проявления фоторезиста на поверхности GaAs может оставаться углеродная пленка толщиной до 5 нм [43]. Напыление металла на такую поверхность приводит к росту коэффициента неидеальности ВАХ барьера Шоттки [43,44]. Для улучшения ВАХ в работе [43] предложено удалять эту пленку, химически обрабатывая поверхность GaAs. В настоящей работе [45] анализируется возможность использования химических обработок в технологии ПТШ для очистки поверхности GaAs от углеродных загрязнений.

Основными требованиями к омическим контактам являются низкое сопротивление, воспроизводимость параметров при изготовлении и долговременная стабильность их характеристик при эксплуатации.

Низкое сопротивление (удельное сопротивление $\sim 10^{-6}$ Ом·см²) в омических контактах стока, истока полевых транзисторов достигается сплавлением в n-GaAs эвтектического сплава AuGe и Ni. Для увеличения электропроводности, устойчивости к коррозии и улучшения условий присоединения выводов на тонкий слой AuGe/Ni напыляют толстый слой золота.

Однако система AuGe/Ni/Au при повышенной температуре нестабильна во времени, поскольку при воздействии высоких температур Ga легко мигрирует на поверхность через верхний слой Au, в то же время Au мигрирует в нижележащие слои. В результате таких непрерывно протекающих реакций между омическим контактом и верхним слоем Au контактное сопротивление повышается, и ухудшаются условия приварки выводов. Для предотвращения этой нежелательной взаимной миграции Ga и Au между слоем омического контакта AuGe и верхним слоем Au необходимо располагать слой материала, который выполнял бы роль барьера при встречной диффузии Ga и Au.

Этот материал должен обладать хорошей электропроводностью и адгезией к контактирующим с ним металлам (в нашем случае – к AuGe и Au) и в то же время препятствовать миграции. Такими надежными барьерными материалами могут быть нитриды, бориды, карбиды металлов [46], а не металлы, как это утверждается в некоторых работах, рассматривающих системы омических контактов с диффузионными барьерами на основе Ni, Ag и др., например, AuGe/Ni/Au, AuGe/Ag [47]. Использование нитридов, боридов и т. д. в качестве диффузионных барьеров в производстве ПТШ обсуждалось во многих работах: [48] (TiN), [49] (TiWN), [50] (ZrB₂ и TiB₂).

При создании омических контактов ПТШ в усилителях выходной мощностью 100 мВт, работающих при температуре канала 200° С, были апробированы барьерные материалы TiN и TiWN [51,52]. Хорошие результаты, критерий которых определялся сохранением параметров ПТШ после 24 ч работы при 300°С, были получены с барьером на основе TiWN толщиной 50 нм, который был использован при изготовлении ПТШ WJ-F105R фирмы WJC, США.

Далее будут представлены результаты исследований одного из перспективных претендентов на использование в качестве диффузионного барьера для омических контактов - гексаборида лантана [53]

Кроме уменьшения длины основания затвора, сопротивления затвора и улучшения омических контактов, улучшение характеристик ПТШ может быть достигнуто при использовании новых полупроводниковых материалов и гетероструктур, среди которых важное место занимают двойные и тройные соединения индия, в том числе и фосфид индия. При выборе новых структур для транзисторов приходится решать ряд проблем. Для увеличения быстродействия транзистора желательно увеличивать всплеск дрейфовой скорости электронов в слое канала под субмикронным затвором. Достигается это обычно за счет увеличения подвижности электронов при использовании в этих гетероструктурах слоя канала с шириной запрещенной зоны меньшей, чем у GaAs, но с большей слабополевой подвижностью, например тройных соединений $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Эта мера используется в совокупности с введением в структуру более широкозонных и принципиально нелегируемых спейсеров выше и ниже слоя канала. Дополнительно к этому используется технология локального (селективного) легирования донорами слоев, расположенных выше слоя верхнего спейсера и ниже нижнего спейсера. В настоящее время именно на гетероструктурах такого типа при использовании гетеропереходов «InAlAs спейсер - $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ канал» на подложках из фосфида индия получено большинство рекордных по максимальной рабочей частоте результатов [54-60]. В идеале возможно с блестящими перспективами использование даже InAs канала [61].

При этом, однако, возникает по крайней мере еще две проблемы:

1. При высокой подвижности электронов структура становится крайне чувствительной к наличию в ней дефектов. Соответственно небольшое количество дефектов ведет к значительному снижению подвижности и к сильному падению быстродействия прибора. Поэтому использование структур с повышенной подвижностью накладывает очень высокие требования на чистоту исходных материалов и качество изготовления структур.

2. Для повышения подвижности используют узкозонные материалы, что снижает пробивные напряжения транзистора, поэтому выходная СВЧ мощность ПТШ возрастает меньше, чем ток на участке насыщения выходных ВАХ.

Для решения обеих этих проблем, в частности, есть, по крайней мере, такой перспективный путь — использование относительно широкозонных материалов, (например, InP), которые из-за большого энергетического зазора между Γ и L-долинами и большого порогового поля могут иметь дрейфовую скорость насыщения больше, чем в GaAs. Можно ожидать, что транзисторы на таких структурах будут обладать большими величинами выходной мощности и шириной динамического диапазона при не худших, по крайней мере, чем у ПТШ на гетероструктурах на основе GaAs, остальных характеристиках [62] и будут гораздо менее чувствительны к дефектности структур. Теоретический анализ показывает, что даже при вдвое меньшей подвижности электронов, InP ПТШ имеют преимущество перед GaAs ПТШ по предельной частоте усиления по току f_T и коэффициентам усиления при оптимальной K_{opt} и 50-омных K_{50} нагрузках [63]. Это преимущество обусловлено большим энергетическим зазором между Γ - и L-долинами в InP, вследствие чего в InP выше пороговые поля и максимальная скорость электронов как в стационарных, так и в нестационарных условиях. Это способствует большему «всплеску» дрейфовой скорости электронов, а значит, уменьшает пролетное время и увеличивает f_T , K_{opt} , K_{50} . Экспериментальная апробация InP полевого транзистора с изолированным затвором, обладающего предельной частотой усиления по току $f_T = 29$ ГГц даже при большой длине основания затвора, равной 1 мкм, подтверждает этот вывод [64].

Самостоятельный интерес представляет исследование эффекта роста «всплеска» скорости электронов в структурах с пониженной подвижностью, но повышенными пороговыми полями не только теоретически, но и экспериментально, особенно при субмикронных длинах основания затвора, когда эффекты всплеска дрейфовой скорости электронов играют гораздо более важную роль [65], но эти исследования сдерживаются высокой стоимостью InP подложек.

1.2.1. Зависимость характеристик барьеров Шоттки полевых СВЧ транзисторов от особенностей химической обработки

Формирование затвора в ПТШ проводилось методом взрывной фотолитографии с использованием фоторезиста УФН-1, а барьер Шоттки формировался напылением Ti/Au. Перед напылением проводилось травление GaAs в аммиачно-перекисном травителе, пластины промывались в деионизированной воде и далее обрабатывались следующими способами: контрольные пластины оставались без обработки (способ 1); пластины обрабатывались в растворе $H_3PO_4 : H_2O$ в пропорции 1:1 в течение 40 с (2); $H_3PO_4 : H_2O$ в пропорции 1:4 – 40 с (3); $HCl : H_2O$ в пропорции 1:1 – 40 с (4); $HCl : H_2O$ в пропорции 1:2 – 5 с (5); $NH_4OH : H_2O$ в пропорции 1:10 – 5 с (6).

Для изучения влияния обработок поверхности GaAs на параметры ПТШ использовались различные методики контроля: профилирование состава затворной металлизации, контроль ВАХ барьеров, Оже-электронная спектроскопия. Из ВАХ определялась также зависимость коэффициента идеальности n от напряжения:

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dU}{d \ln I} - IR_s \right), \quad (1-1)$$

В формуле (1-1) обозначено: U , I – напряжение и ток в барьере; q – заряд электрона; R_s – последовательное сопротивление затворного металла; T – температура; k – постоянная Больцмана.

Измерение Оже-спектров после различных технологических воздействий проводилось на установке 09ИОС-2, а распределение элементов в затворном металле – на установках Самеса JMS-3F и JAMP-10S.

Результаты экспериментов

Исследования ВАХ ПТШ показали, что введение дополнительных химических обработок GaAs перед осаждением титана и золота приводит к росту коэффициента идеальности и появлению низкотоковых утечек (рисунок 1-11). Образцы, обработанные способами 5 и 6, показали результаты, аналогичные

способам 3 и 4. Исследование состава границы раздела металл–полупроводник позволяет связать это ухудшение с большим количеством углерода на поверхности GaAs (рисунок 1-12). Можно выделить два пути ее загрязнения – осаждение углерода из используемых растворов либо разрушение фоторезиста.

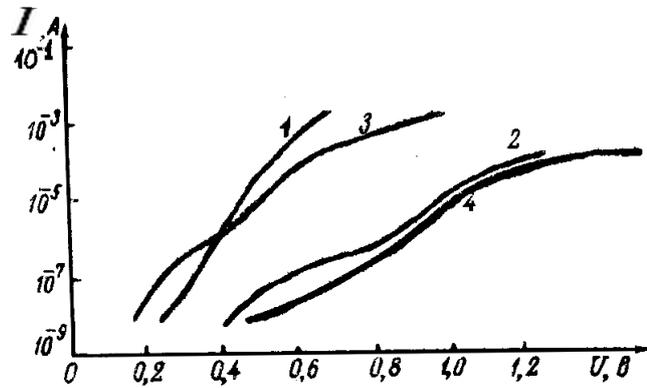


Рис. 1-11. Влияние обработок поверхности GaAs на ВАХ барьера Шотки:
1 – по способу 1; 2 – по способу 2; 3 – по способу 3; 4 - по способу 4.

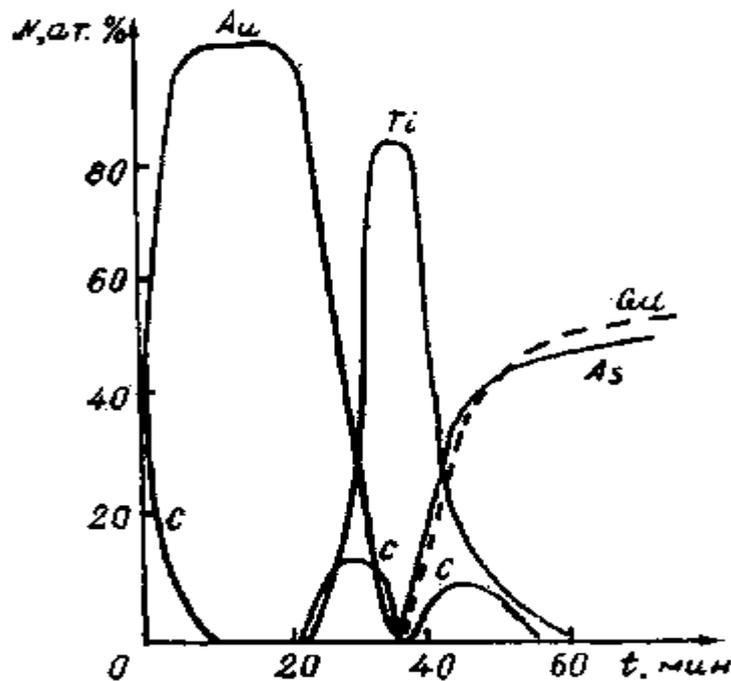


Рис. 1-12. Профили распределения элементов в затворном слое металлизации.

Проведенные сравнения по воздействию химических обработок на поверхность GaAs, либо имеющую, либо не имеющую покрытия слоем фоторезиста (смотри таблицу 1), позволили сделать вывод, что основным

источником загрязнений является фоторезист. Помимо этого, было обнаружено, что при приближении к краю проявленного участка фоторезиста, количество углерода на поверхности растёт, что важно, поскольку современные ПТШ имеют длину основания затвора менее 1 мкм, поэтому удаление продуктов реакции при химических обработках затруднено.

Таблица 1. Влияние химических обработок на состав поверхности GaAs.

Способ обработки	Ga/As		C/C ₀	
	с рисунком фоторезиста УФН-1	без фоторезиста	с рисунком фоторезиста УФН-1	Без фоторезиста
1	1,2	1,2	1,0	1,0
2	1,0	1,0	1,3	0,9
3	1,2	1,0	1,4	0,9
4	1,0	1,0	1,6	1,0

Примечание: Ga/As – отношение поверхностных концентраций Ga к As; C/C₀ – изменение поверхностной концентрации углерода под воздействием обработок.

Для ослабления разрушения фоторезиста были опробованы полимеризация ультрафиолетовым излучением и сушка при 80° С. Эти методы не привели к положительному результату, поэтому для снижения разрушения фоторезиста и повышения воспроизводимости характеристик барьеров в ПТШ необходимо искать либо новые резистивные маски, либо другие методы обработок, например ионно-лучевое травление [66].

Влияние углерода на ВАХ барьеров Шоттки

Помимо роста коэффициента идеальности барьера Шоттки, загрязненного углеродом, для него наблюдаются также изменение ВАХ со временем, зависящее от напряжения смещения на барьере (рисунок 1-13), и рост коэффициента идеальности при малых смещениях на барьере (рисунок 1-14).

К характерным особенностям контактов Шоттки, загрязненных углеродом, следует отнести и появление утечек в низковольтной области ВАХ (смотри рисунок 1-11). Дополнительно проведенные на тестовых структурах исследования позволили сделать вывод, что эти особенности могут быть связаны с углеродом, а не только с кислородом, как это показано в работе [67].

Для того чтобы ослабить влияние углерода на ВАХ диодов Шоттки (диаметр барьера 100 мкм) необходимо обеспечить как можно меньший разброс по кислороду, поверхность GaAs обрабатывалась следующим образом.

Методика 1. Обработка двукратным кипячением пластин в моноэтаноламине с промывкой их в деионизированной воде, травлением в серноперекисном травителе в течение 5 с промывкой в деионизированной воде и сушкой в центрифуге.

Методика 2. Обработка травлением пластин в лимонно - перекисном травителе, промывкой их в деионизированной воде, кипячением в H_3PO_4 в течение 30 с, промывкой в деионизированной воде и сушкой в центрифуге.

После таких обработок на поверхности, обработанной по методике 1, остается менее 50% углерода, а по методике 2 – 70–80%. При этом соотношения между поверхностными концентрациями галлия и мышьяка, а также амплитудой Оже-пика кислорода на пластинах, обработанных по обоим методикам, отличаются друг от друга не более чем на 10%.

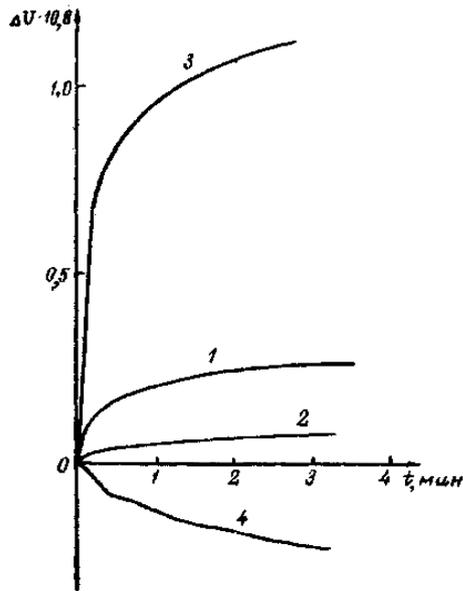


Рис. 1-13. Влияние технологии изготовления барьера Шоттки на зависимость его ВАХ от времени при обработке по способу 1 при $I=10^{-3}$ А (1); по способу 1 при $I=10^{-8}$ А (2); по способу 3 при $I=10^{-3}$ А (3); по способу 3 при $I=10^{-8}$ А (4).

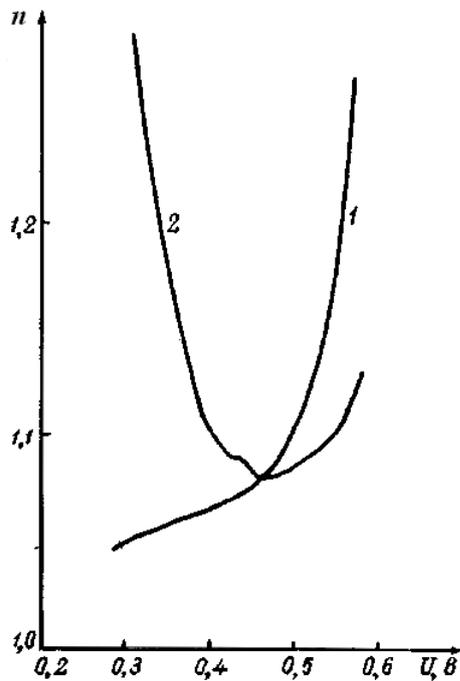


Рис. 1-14. Влияние состава поверхности на зависимость коэффициента идеальности от напряжения при $R_s = 1,5$ Ом для поверхностей, обработанных по методике 1 (кривая 1) и по методике 2 (кривая 2).

Полученные результаты представлены на рисунке 1-14. Видно, что диоды, обработанные по методике 2, действительно имеют при малых напряжениях повышенные значения коэффициента идеальности.

В случае окисления поверхности GaAs в H_2O_2 в течение 2 мин после обработки по методике 1 не было обнаружено утечек в низкотоковой области. Однако при этом увеличились коэффициенты идеальности барьеров и начали проявляться релаксационные явления, хотя и более слабые, чем на транзисторах.

Результаты проведенных исследований позволили сделать вывод о необходимости дополнительных обработок поверхности арсенида галлия для обеспечения необходимых технологических и электрических параметров. При этом решается задача обеспечения таких технологических параметров как адгезия резистов к арсениду галлия при проведении процессов электронной литографии и фотолитографии, также решается задача адгезии металлов к арсениду галлия и получение стабильных и высоких параметров как барьерных, так и омических контактов. Далее пластины стали обрабатываться следующим образом:

Пластины без слоя резиста перед электронной литографией обрабатываются в плазме O_2 в течении 2 мин, а затем в аммиачном растворе ($NH_4OH:H_2O$ (1:10)) в течение 15 с.

Пластины с нанесенным слоем резиста перед следующей операцией (кроме затворной литографии) обрабатываются в плазме O_2 в течении 1 мин, а затем в солянокислом растворе ($HCl:H_2O$ (1:1)) в течении 10 с.

Пластины после проведения литографии по затвору, обрабатывают в плазме O_2 в течении 30 с, а затем в солянокислом растворе ($HCl:H_2O$ (1:1)) в течении 10 с.

Перед напылением затворной металлизации, поверхность GaAs травят в серноокислотно – перекисном травителе, аммиачно – перекисных травителях (разных составов) и цитратноперекисном травителе.

Перед нанесением фоторезистов при фотолитографиях «мосты» и «гальваника» на пластины наносят слой промоутера адгезии – гексаметилтрисилазана. Перед напылением нижних обкладок конденсаторов и

подслоя пластины обрабатывают 10 – 15 с в аммиачно – перекисном травителе ($\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$ (1:1:125)).

1.2.2. Улучшение качества омических контактов GaAs полевых транзисторов при введении в них диффузионного барьера.

Гексаборид лантана LaB_6 обладает сравнимым с TiB_2 сопротивлением, но меньшей температурой плавления. Его характеристики практически сохраняются при некотором нарушении стехиометрического состава, неизбежном при распылении (табл. 2, [52]).

Таблица 2. Свойства TiB_2 и LaB_6 .

Материал	Сопротивление, мк Ом·см		Температура плавления, °С
	Монолит	Тонкие пленки	
TiB_2	29-87	130	2770
LaB_6	15	82	2210

Напыление диффузионного барьера, образуемого слоем LaB_6 при формировании омических контактов методом обратной («взрывной») литографии и исследование их параметров проводились на ПТШ, топология которого представлена на рисунке 1-15. Для изготовления ПТШ использовались арсенид-галлиевые структуры типа $i-n_0-n-n^+$ (ЕТ0.035.026 ТУ) с концентрацией носителей заряда в n^+ -слое, равной $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Перед напылением слоев омического контакта $Ni/Au:Ge$ для окисления и удаления остатков резиста, поверхность структуры GaAs обрабатывалась в плазме кислорода на установке типа 08ПХ0-100-001 в течение 1 мин при мощности 600 Вт, окислы удалялись химическим травлением в $NH_4OH:H_2O=1:1$. При этом стехиометрический состав поверхности GaAs-структуры [согласно анализу, выполненному методом электронной Оже-спектроскопии (ЭОС)] практически не нарушался ($Ga/As = 1,02$). Время пребывания пластин GaAs на воздухе (до помещения их в напылительную установку) после химической обработки не превышало 3 мин.

С целью уменьшения сопротивления, слой Ni , способствующий большему внедрению Ge в GaAs, наносился тонким слоем на поверхность GaAs [68, 69, 70].

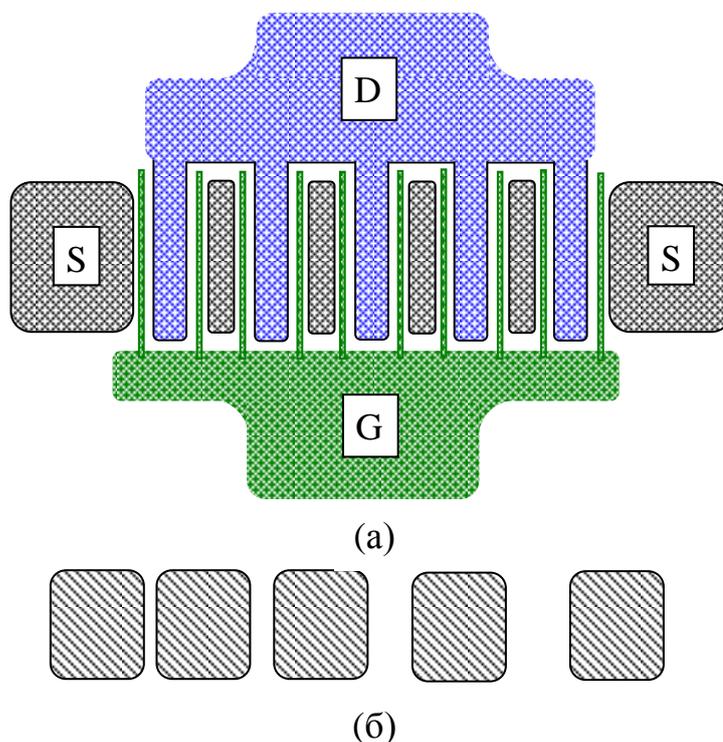


Рис. 1-15. Топология транзисторных структур (а) и тестов омических контактов (б).

Напыление слоев омических контактов Ni/AuGe/LaB₆/Au осуществлялось в едином технологическом процессе. Ni (5-6 нм), эвтектический сплав AuGe (40-50 нм) и Au (300-400 нм) распылялись методом резистивного нагрева, LaB₆ (100-150 нм) – электронным лучом. Толщина напыляемых материалов и ее воспроизводимость от процесса к процессу контролировались с помощью резистивных датчиков. Вплавление омических контактов проводилось в потоке H₂ при температуре 410° С в течение 30 с (нагрев и выдержка) и быстром охлаждении (перемещении пластин в холодную зону печи после вплавления в течение 1–2 с).

Сопротивление омических контактов измерялось на тестовых структурах по методике, описанной в работе [71] и транзисторах по методике [72]. Тестовые структуры формировались на пластинах из GaAs одновременно с транзисторными структурами (смотри рисунок 1-15б). Анализ состава поверхности контактной металлизации осуществлялся методом ЭОС на спектрометре 09ИОС-02 с использованием табличных коэффициентов относительной чувствительности элементов и стандартной методики расчета состава [73]. Распределение профилей

элементного состава определялось с помощью Оже-спектрометра JAMP-10. Результаты сравнительного исследования омических контактов с диффузионным барьером и без него, после операции сплавления приведены в таблице 3 и на рисунке 1-16.

Таблица 3. Параметры контактов с диффузионным барьером и без него.

Состав слоев омических контактов	Сопротивление, Ом·см ²	Элементный состав поверхности омического контакта, массовые %.		
		Au	Ga	C, O и др.
Ni/AuGe/LaB ₆ /Au	1·10 ⁻⁷	97	-	3
AuGe/Ni/Au	1·10 ⁻⁶	76	20	4

Из таблицы 3 видно, что традиционная металлизация омических контактов дает большее сопротивление контакта, а на поверхности контакта присутствует Ga. Это объясняется миграцией Ga из GaAs через верхний слой золота, в то время как LaB₆ препятствует этому явлению.

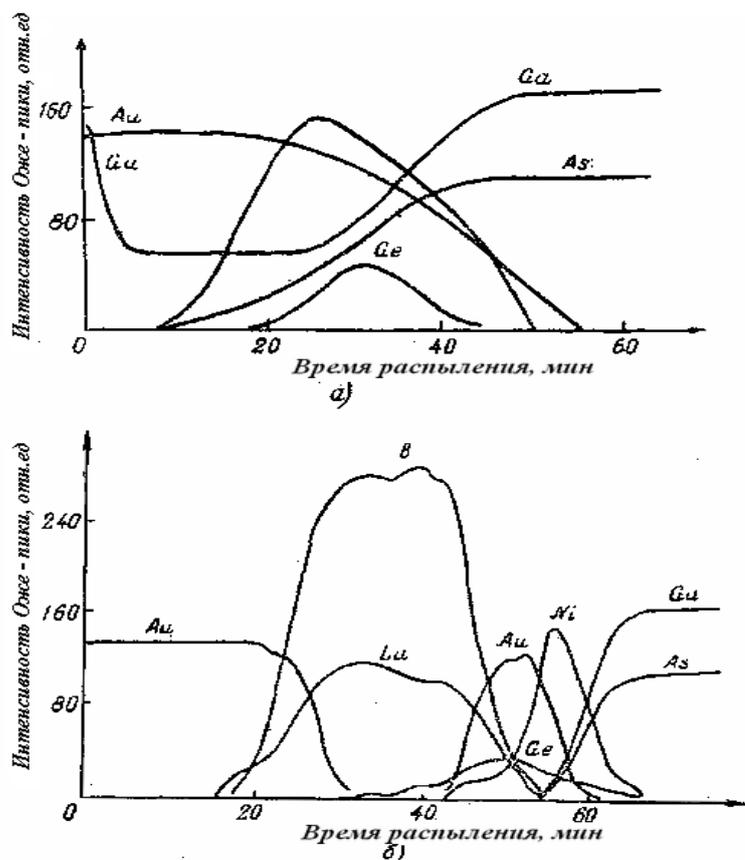


Рис. 1-16. Оже-профили элементов омических контактов систем металлизации Au/Ni/AuGe–GaAs (а) и Au/LaB₆/AuGe/Ni–GaAs (б).

Образцы с омическими контактами исследовались на стабильность при повышенных температурах. Прогрев образцов при температуре 200° С в течение 6 ч в обоих случаях не изменил сопротивления, однако состояние поверхности в контактах без LaB₆ - диффузионного барьера существенно ухудшилось за счет увеличения Ga до 60% (состав поверхности контакта по Au стал равным только 36%). По результатам прогрева омических контактов при 350° С, приведенным на рисунке 1-17, видно, что в течение первых 6 часов происходит относительно быстрый рост сопротивления, затем следует длительный период медленного возрастания. Контактное сопротивление после 45 ч прогрева при 350° С не превышает $5,5 \cdot 10^{-7}$ Ом·см², что свидетельствует о достаточной эффективности слоя LaB₆, блокирующего миграцию Ga из GaAs, и обратную миграцию Au в слой GaAs.

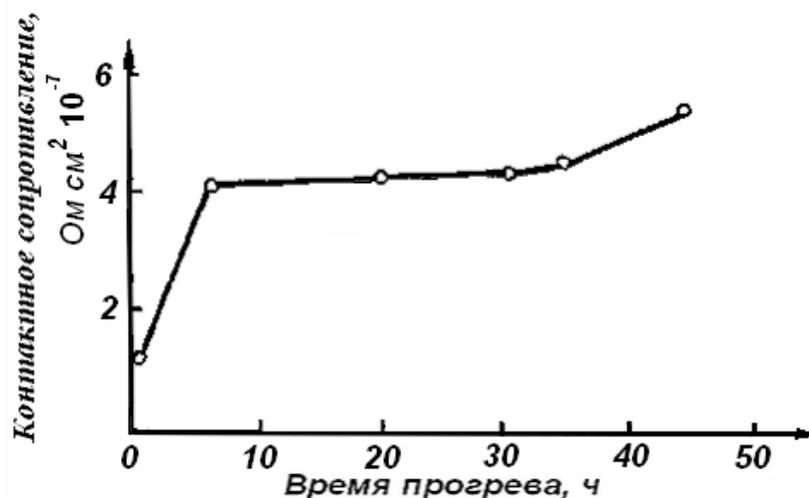


Рис. 1-17. Зависимость сопротивления омических контактов на основе системы металлизации Ni/AuGe/LaB₆/Au от времени при температуре 350°С.

Таким образом, разработан технологический процесс формирования омических контактов ПТШ Ni/AuGe/LaB₆/Au нового типа - с диффузионным барьером на основе слоя гексаборида лантана, обеспечивающий низкое контактное сопротивление и высокую термостабильность омических контактов.

Таким образом продемонстрировано, что при наличии большого количества углерода на границе раздела металл-полупроводник в ПТШ могут наблюдаться как дрейф во времени параметров транзистора, проявляющийся в виде

нестационарности ВАХ, так и в виде увеличения тока утечки ВАХ барьеров Шоттки. Показано, что при проведении химических обработок в жидкофазных реагентах перед формированием металлизации контакта Шоттки наблюдается загрязнение поверхности GaAs углеродом, происходящее, в основном, на этапе локального удаления фоторезиста. Результаты проведенных исследований позволили сделать вывод о необходимости дополнительных очисток поверхности арсенида галлия, освобожденной от резиста, необходимых для обеспечения хорошего качества границ раздела и контактов «металл – полупроводник». Экспериментально показано, что эти обработки (тщательная очистка поверхности GaAs в окнах резиста) позволяют получить хорошие и стабильные электрические параметры контактов, после чего ряд дополнительных операций был включен в технологические маршруты изготовления транзисторов и различных монолитных интегральных схем.

Рассмотрены свойства металлизации омических контактов с диффузионным барьером на основе гексаборида лантана LaB_6 для омических контактов истоков и стоков арсенид-галлиевых транзисторов, а также технология формирования таких контактов. Показано, что система металлизации для омических контактов $\text{Ni}/\text{AuGe}/\text{LaB}_6/\text{Au}$, сформированная на поверхности GaAs, обладает низким сопротивлением (получено удельное сопротивление $1 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$) и стабильностью при высоких температурах (при 300° C). Таким образом, разработан технологический процесс формирования нового типа омических контактов – контактов с диффузионным барьером на основе гексаборида лантана $\text{Ni}/\text{AuGe}/\text{LaB}_6/\text{Au}$ для ПТШ, обеспечивающий низкое контактное сопротивление и высокую термостабильность.

1.3. НАКЛОННОЕ НАПЫЛЕНИЕ ЗАТВОРА В ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ.

Одними из основных параметров СВЧ полевых транзисторов являются коэффициент усиления, коэффициент шума, выходная мощность, коэффициент полезного действия и ширина диапазона рабочих частот.

При разработанной и хорошо оптимизированной технологии изготовления транзистора, основные параметры практически полностью определяются полупроводниковой структурой, длиной основания и шириной затвора транзистора, его сопротивлением, сопротивлением исток-затвор, пробивными напряжениями.

Получение хороших параметров, указанных выше, обеспечивается конструктивно-технологическими особенностями изготовления, как эпитаксиальной структуры, так и самого транзистора. Особое место занимают особенности, связанные с конструкцией и технологией изготовления затвора и его расположением между истоком и стоком.

Помимо параметров эпитаксиальной структуры, коэффициент усиления и коэффициент шума в основном зависят от длины основания затвора и его сопротивления – чем короче основание затвора и меньше сопротивление затвора, тем выше коэффициент усиления и меньше коэффициент шума. При этом величина выходной мощности СВЧ ПТШ, зависит как от длины каждой одиночной секции затвора и их количества, определяющих величину максимального тока стока.

Заметим, что требования, предъявляемые к параметрам затвора транзистора, вступают в противоречие. Так при уменьшении длины основания затвора обратно пропорционально растет его омическое сопротивление. Для того, чтобы избежать резкого ухудшения характеристик прибора при малых высоте ножки и длине основания затвора (порядка четверти микрона и менее), в мощных СВЧ ПТШ используют составной затвор - называемый Т-образный затвор [74-86], в котором для снижения омического сопротивления на ножке затвора дополнительно формируется шляпка с характерным размером поперечного сечения около 1 мкм.

Однако даже при Т-образном затворе, т.е. даже при сравнительно большом размере поперечного сечения одиночной секции затвора, из-за роста ее сопротивления и фазовых набегов (в направлении длины секции) при росте длины секции удельная выходная мощность в расчете на единицу ширины затвора снижается, также увеличивается коэффициент шума. Поэтому, с целью устранения этих недостатков, мощные СВЧ транзисторы с барьером Шоттки, изготавливаются в виде чередующейся структуры, так называемых гребенок электродов истока, затвора, стока, когда одиночные секции электродов затвора расположены между электродами истока и стока [87]. Благодаря параллельному соединению одинаковых по длине одиночных секций затвора удается снизить сопротивление всей совокупности электродов затвора, и тем самым частично увеличить коэффициент усиления по мощности, снизить коэффициент шума, но наиболее важным остается минимизация продольного сопротивления каждой одиночной секции затвора. Характерные размеры длины одиночной секции затвора составляют $40 \div 100$ мкм при характерных размерах поперечного сечения шляпки затвора, равных $0.3 \div 1$ мкм. Это соотношение размеров показывает, что выбор излишне большой длины одиночной секции затвора (в направлении его ширины) приводит к недопустимо большому сопротивлению и фазовому набегу по ее длине.

Пробивное напряжение транзистора в свою очередь зависит от весьма большого числа факторов: конструкции эпитаксиальной структуры и самого транзистора, длины затвора, геометрии поперечного сечения секций затворов, расположения затворного электрода по отношению к истоку и стоку, состояния поверхности, толщин диэлектрических слоев и т.д. Есть предположение, что для улучшения пробивного напряжения и улучшения однородности затворов по его ширине ряд западных фирм использует даже так называемое «вжигание» затвора.

Для увеличения пробивного напряжения затвор-сток и уменьшения сопротивления исток-канал, простейший несоставной затвор транзистора (например, с трапециевидной формой сечения) располагают в заглубленной канавке между истоком и стоком со смещением к истоку. Один из способов

смещения затвора обеспечивается при выполнении двух последовательных операций литографии, что требует высокой точности совмещения при этих двух операциях. Если единичные секции затворов в гребенчатой структуре полевого транзистора расположены в каналах неодинаково, т.е. в разной степени смещены в сторону истока, то это приводит к неидентичности единичных структур в гребенчатой структуре транзистора и, следовательно, к снижению динамических параметров [87].

Проблема точности совмещения и позиционирования затвора в заглубленной канавке может быть решена путем использования способа самосовмещения [2, 87-90], в котором формирование углубления под основанием затвора и сам электрод затвора формируются с использованием одной и той же маски. Обычно для формирования элементов с субмикронными размерами используется электронная литография (ЭЛЛ). Одной из характерных особенностей процесса экспонирования ЭЛЛ-резиста высокоэнергетическими электронами является так называемый эффект близости [87], который проявляется в том, что нижняя часть слоя ЭЛЛ-резиста получает большую дозу экспонирования за счет отраженных и рассеянных от поверхности полупроводника электронов. Таким образом, при формировании в слое ЭЛЛ-резиста субмикронных рисунков, размер окна в нижней части слоя резиста получается больше, чем в верхней части. Так в ЭЛЛ-резисте можно создать боковые стенки с отрицательным углом наклона (рисунок 1-18).

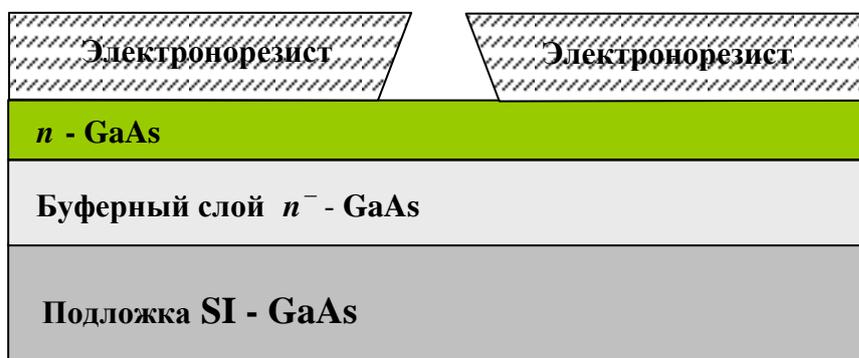


Рис. 1-18. Профиль боковых стенок резиста после электронной литографии.

Такой профиль боковых стенок в окне ЭЛЛ-резиста облегчает процесс формирования металлических электродов методом «взрывной» литографии. При

этом методе электроды формируются путем напыления металлов на полупроводниковую пластину с рисунком в слое резиста. Далее следует обработка в растворителе резиста, при которой та часть слоя металла, которая нанесена на поверхность полупроводника остается на ней, а другая часть слоя металла - на поверхности резиста, удаляется при разбухании резиста в растворителе, отделяясь при этом от поверхности полупроводника (рисунок 1-19).

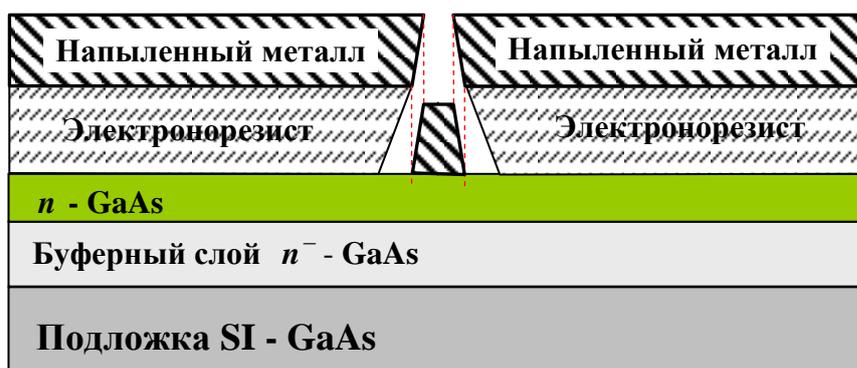


Рис. 1-19. Взрывное формирование металлизации истока, стока и затвора.

Если при формировании затворного электрода использовать способ «взрыва», то при этом для формирования подзатворного углубления и самого затворного электрода можно использовать одну и ту же маску из ЭЛЛ-резиста. Такой метод формирования элементов транзистора называется самосовмещением. Основным его достоинством является высокая точность совмещения расположений затвора и углубления в слое канала (рисунок 1-20).

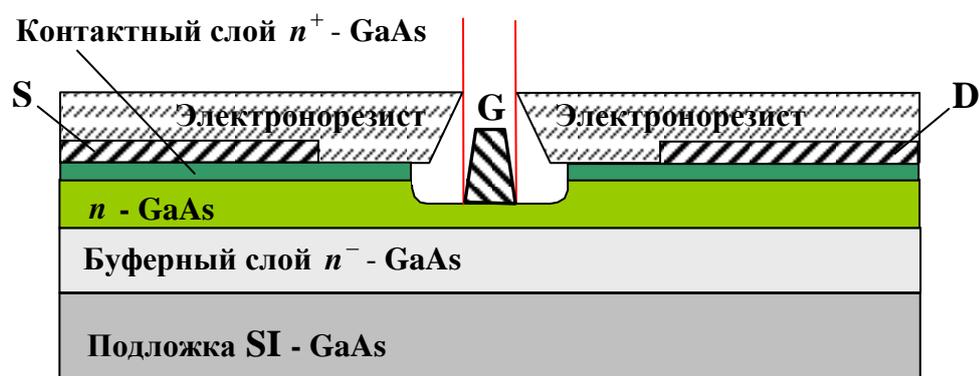


Рис. 1-20. Самосовмещение при формировании подзатворной канавки и затвора.

При формировании структуры мощного транзистора для улучшения динамических характеристик желательно располагать затвор в углублении так,

чтобы он был смещен к истоку на некоторое определенное расстояние. При недостаточном смещении не будет получено достаточно малое сопротивление исток-затвор, при слишком большом смещении в сторону истока будет уменьшаться пробивное напряжение между затвором и истоком, а при слишком малом расстоянии напряжение пробоя может достичь неприемлемо низкой величины.

Осуществить необходимое смещение затвора на заданную величину возможно если при формировании затвора проводить процесс напыления так, чтобы поток напыляемого металла был направлен по отношению к плоскости полупроводниковой подложки под определенным углом, при этом затвор, формируемый в углублении, будет смещен в нужную сторону на расстояние, определяемое углом между плоскостью полупроводниковой пластины и потоком напыляемого затворного металла. Если расположить источник напыляемого металла и подложку так, чтобы между плоскостью подложки и потоком напыляемого металла был определенный и постоянно воспроизводимый угол, то смещение затвора в углублении тоже будет постоянным и воспроизводимым (рисунок 1-21).

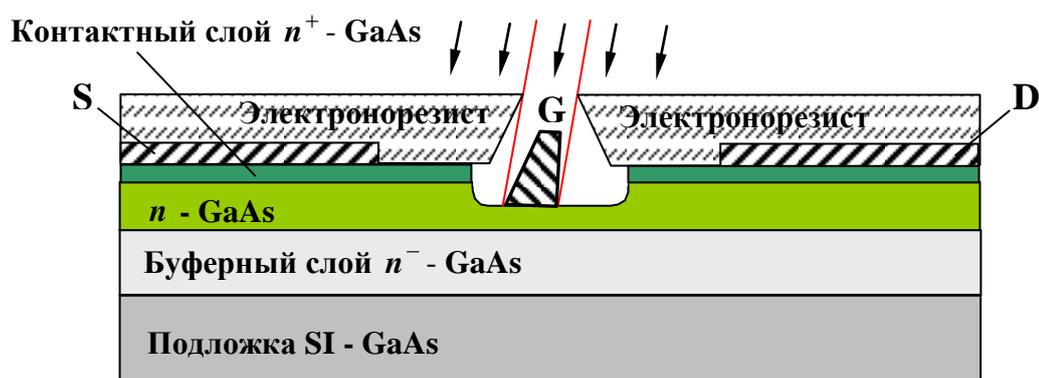


Рис. 1-21. Напыление затворного электрода под углом к плоскости полупроводниковой подложки.

Такой способ напыления затворного металла «под углом» не применим для изготовления традиционной гребенчатой структуры полевых СВЧ транзисторов, в которой чередуются электроды истока и стока, а между ними расположены одиночные секции затворов, так как при смещении одной секции затвора в

сторону истока другая, следующая соседняя секция затвора смещается в сторону стока.

При формировании смещенного Т-образного затвора возникает ряд проблем, так, например, при недостаточно высокой ножке может сформироваться область короткого замыкания вида «исток-затвор», а при слишком малой длине основания затвора могут образовываться разрывы ножки затвора. Эти разрывы крайне проблематично обнаружить, так как управляющее напряжение передается по шляпке, а при общей ширине затвора транзистора в несколько миллиметров область разрыва порядка долей микрона совершенно не проявляется на ВАХ. Однако в процессе работы эта область служит горячей точкой, в которой канал транзистора не перекрывается и при даже малых напряжениях на стоке в ней развивается пробой, ведущий к выходу прибора из строя.

В следующих разделах этой главы приведены решения ряда приведенных выше проблем. Будет проведено экспериментальное исследование изменения параметров транзистора в зависимости от расположения одиночных секций затворов в канавке, представлена оригинальная структура транзистора и способ ее изготовления, позволяющие с высокой точностью совмещать затворы транзистора и смещать их в сторону истока [91-94]. Будет предложен способ, позволяющий с высокой точностью формировать составной затвор в Г-образном исполнении с длиной основания затвора существенно меньшей, чем позволяет разрешающая способность используемого литографического оборудования.

1.3.1. Зависимость параметров мощного полевого транзистора от величины смещения затвора

Как указывалось выше, при попытке углового напыления затвора в традиционной гребенчатой структуре возникает проблема - одна затворная секция оказывается смещенной к истоку, а соседняя – смещенной к стоку. Для преодоления этой проблемы был разработан и используется оригинальный, конструктивно-технологический подход [91-92].

Ключевыми особенностями в нем являются:

- оригинальная конструкция многосекционного транзистора с большой шириной затвора, содержащая не менее двух секций, позволяющая формировать затворы в канале со сдвигом их в сторону истока;
- наклонное напыление металлов для сдвига затворов в канале к истоку.

Разработанная конструкция мощного СВЧ ПТШ отличается от традиционной. Суть данной конструкции можно понять с помощью рисунка 1-22б, где она приведена в сравнении с традиционной конструкцией (рисунок 1-22а).

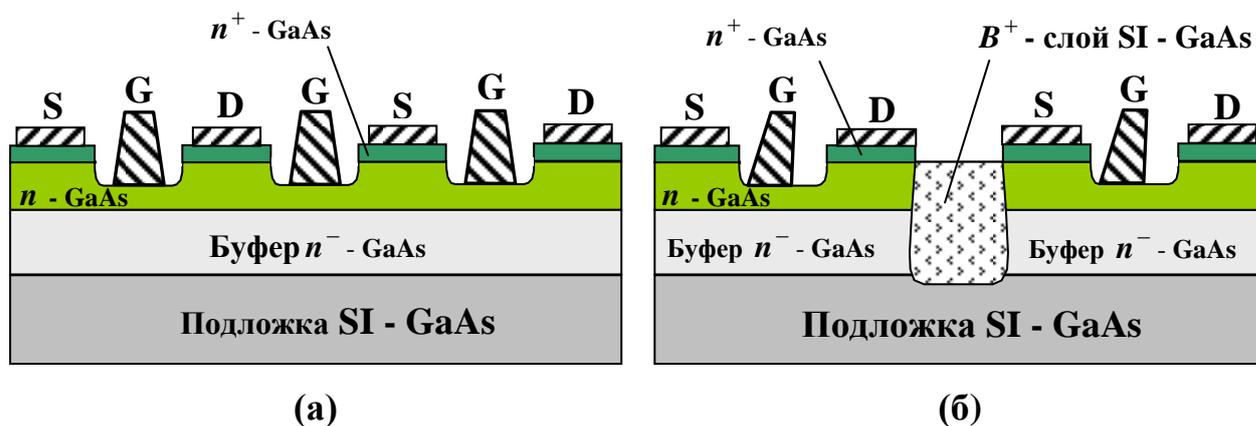


Рис. 1-22. Структура мощного ПТШ. «а» - традиционная конструкция, «б» – разработанная конструкция.

Конструкция ПТШ, представленная на рисунке 1-22б, позволяет формировать затвор в канале транзистора путем напыления металлизации затвора под наклоном. В результате каждая секция затвора оказывается смещенной в

канавке канала в сторону истока, что позволяет снизить сопротивление истока, уменьшить напряжение насыщения, увеличить пробивное напряжение сток-затвор и тем самым увеличить коэффициент усиления и КПД транзистора.

Однако и такой конструкции СВЧ полевого транзистора с барьером Шоттки присущи ряд недостатков, а именно:

-во-первых, при достаточно малых размерах области полуизолирующего арсенида галлия, формируемой с помощью B^+ -бомбардировки ($B^+ - SI GaAs$), наблюдается увеличение тока утечки между соседними электродами исток-сток, разделенными этой областью. Это приводит к появлению неуправляемого электродом затвора тока стока, приводящего к снижению коэффициента усиления, выходной мощности и коэффициента полезного действия,

-во-вторых, при некоторых размерах канавок с единичными секциями затвора, выполненных между электродами исток-сток, имеет место снижение пробивного напряжения, и, следовательно, снижение выходной мощности.

Избежать появления этих проблем можно оптимизировав элементы конструкции. Практика показала, что при использовании несоставного затвора (например, с прямоугольным или с трапециевидным сечением) желательно обеспечить следующие размеры элементов конструкции. Области B^+ -полуизолирующего арсенида галлия должны быть выполнены шириной равной 4-6 мкм; канавки в парах электродов исток-сток - выполнены шириной равной 0,9-1,3 мкм при глубине, равной 0,2-0,3 мкм; единичные секции затвора (с длиной основания не более 0,7 мкм) расположены от края канавок со стороны электродов истока и стока на расстояниях, равных 0,1-0,3 и 0,5-0,7 мкм соответственно [93].

Такой мощный СВЧ полевой транзистор с барьером Шоттки может иметь слой $n^+ - GaAs$ для формирования омических контактов истока и стока толщиной 0,1-0,3 мкм, выполненный на активном слое $n - GaAs$ (смотри рисунок 1-22).

Предложенные оптимальные размеры ширины области $B^+ - SI GaAs$, ширины и глубины канавок, в которых расположены единичные электроды

затвора, позволяют исключить повышенные токи утечки между электродами исток-сток, пониженные пробивные напряжения и, следовательно, обеспечить повышение выходной мощности, коэффициента усиления по мощности и коэффициента полезного действия СВЧ полевого транзистора с барьером Шоттки.

Оптимизация расположения единичных электродов затвора, а именно: расположение единичных секций затвора от края канавки на расстоянии равном 0,1-0,3 и 0,5-0,7 мкм со стороны истока и стока соответственно; в совокупности с оптимизацией ширины области $B^+ - SI GaAs$, ширины и глубины канавки, обеспечивает оптимизацию пробивных напряжений электродов исток-затвор и сток-затвор и паразитного сопротивления исток-затвор и тем самым обеспечивает повышение выходной мощности, коэффициента усиления по мощности и коэффициента полезного действия полевого транзистора.

Как показывают эксперименты, при использовании несоставного затвора (например, с прямоугольным или с трапециевидным сечением) выполнение полуизолирующей области $B^+ - SI GaAs$ шириной менее 4 мкм нежелательно из-за значительного повышения токов утечки, а более 6 мкм приводит к увеличению размеров СВЧ полевого транзистора, хотя при этом и снижается удельная тепловая нагрузка на транзистор. Выполнение подзатворной канавки шириной менее 0,9 мкм приводит к существенному снижению пробивных напряжений, а более 1,3 мкм приводит к увеличению расстояния между стоковым краем основания затвора и краем канавок со стороны каждой секции стока, что влечет за собой снижение максимальной рабочей частоты транзистора. Выполнение канавки глубиной менее 0,2 мкм приводит к снижению пробивных напряжений, а более 0,3 мкм - к увеличению ширины канавки за указанные пределы (до 1,3 мкм) из-за бокового травления канавки. Выполнение расстояния между краем канавок и единичными электродами затвора менее 0,1 мкм приводит к снижению пробивного напряжения, а более 0,3 мкм к возрастанию паразитного сопротивления электродов исток-затвор, что влечет за собой снижение коэффициента усиления по мощности. Выполнение контактного слоя толщиной

как менее 0,1 мкм, так и более 0,3 мкм нежелательно, в первом случае он не выполняет своей функции, а именно снижение контактного сопротивления электродов истоков и стоков, а во втором, из-за возможного бокового травления канавки.

На рисунке 1-23 показан фрагмент из двух секций мощного СВЧ ПТШ.

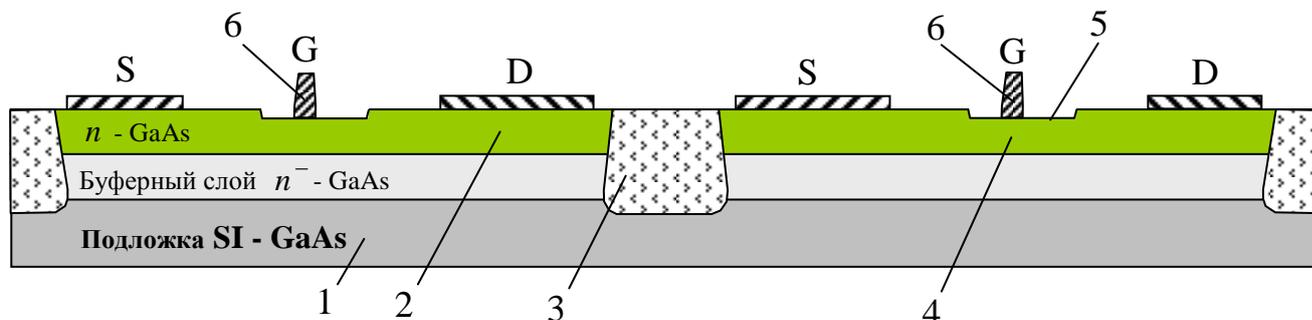


Рис. 1-23. Фрагмент мощного СВЧ полевого транзистора с барьером Шоттки. 1 - подложка из полуизолирующего арсенида галлия (*SI GaAs*); 2 - активный слой; S, G, D - электроды истока, затвора, стока; 3 - области полуизолирующего арсенида галлия $B^+ - SI GaAs$; 4 - каналы; 5 - канавки; 6 - единичные секции затвора с прямоугольным сечением.

Для исследований был изготовлен ряд экспериментальных образцов транзисторов. Мощный СВЧ полевой транзистор с барьером Шоттки был выполнен на полуизолирующей подложке арсенида галлия *SI GaAs* с нелегируемым буферным слоем $n^- - GaAs$ и с активным слоем из $n - GaAs$, толщиной не более 0,4 мкм и концентрацией легирующей примеси доноров не более $3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Транзистор выполнен в виде набора И-З-С секций, состоящего, например, из двух чередующихся последовательностей электродов истока, затвора, стока (И-З-С). При этом между И-З-С секциями сформированы $B^+ - SI GaAs$ области полуизолирующего арсенида галлия 3 шириной равной 5 мкм. В каждой И-З-С секции между электродами истока и стока выполнены каналы 4 с канавками 5. Ширина канавок равна 1,1 мкм, глубина 0,25 мкм. В канавках 5 расположены единичные секции затвора 6 с длиной основания не более 0,7 мкм. Секции затвора

6 расположены на расстоянии, равном 0,2 и 0,7 мкм от края канавок 5 соответственно со стороны электродов истока и стока (смотри рисунок 1-23).

По аналогии с этим транзистором были изготовлены мощные СВЧ полевые транзисторы с барьером Шоттки, но при других значениях ширины области $B^+ - SI GaAs$ 3. Также были изменены ширины и глубины канавок 5, расстояния от края канавок 5 со стороны электродов истока и стока соответственно, на которых расположены единичные секции затвора 6, как указанные в исходных требованиях, так и выходящие за их пределы.

На образцах мощных СВЧ полевых транзисторов с барьером Шоттки были измерены выходная мощность, коэффициент усиления по мощности и коэффициент полезного действия. Данные результатов измерений приведены в таблице 4.

Таблица 4. СВЧ параметры образцов ПТШ с привязкой к размерам его элементов

Параметры конструкции						Результаты измерений СВЧ параметров на частоте 15 ГГц		
№ п/п	Ширина области $B^+ - SI GaAs$ мкм	Ширина канавки под затвором, мкм	Глубина канавки под затвором, мкм	Расстояние секций затворов от края канавки, мкм		K_y , дБ	$P_{\text{вых}}$, мВт	КПД, %
				истока	стока			
1	5	1,1	0,25	0,2	0,6	10	750	40
2	4	0,9	0,2	0,1	0,5	9,8	750	38
3	6	1,3	0,3	0,3	0,7	9,9	740	38
4	3	0,8	0,1	0,05	0,4	8,0	400	25
5	7	1,4	0,4	0,4	0,8	8,0	600	33

Как видно из таблицы 4, образцы мощных СВЧ ПТШ (примеры 1-3) показали достаточно высокую выходную СВЧ мощность - порядка 750 мВт, они

имеют высокий коэффициент усиления по мощности - порядка 10 дБ и высокий КПД, в отличие от образцов мощных СВЧ ПТШ (примеры 4-5), изготовленных с конструктивными параметрами, выходящими за указанные пределы.

1.3.2. Зависимость параметров мощного полевого транзистора от угла напыления металлизации затвора.

В предыдущем разделе была исследована зависимость параметров разработанного полевого транзистора от расположения затвора в канавке. Заданные величины смещений затвора в сторону истока должны воспроизводимо обеспечиваться при изготовлении транзистора. Поэтому далее было произведено исследование зависимости характеристик ПТШ от режимов и условий формирования затвора.

Оказалось [94], что в предложенном способе изготовления СВЧ полевого транзистора с барьером Шоттки, включающем изготовление на лицевой поверхности полуизолирующей подложки, выполненной из полупроводникового материала группы $A^{III}B^V$, с активным слоем, по меньшей мере, одной пары электродов истока и стока, канала между ними с канавкой под электрод затвора, изготовление электрода затвора посредством процессов литографии и напыления металла или системы металлов, образующих омические контакты в области истока и стока, и барьер Шоттки в области затвора, металл или систему металлов, образующих барьер Шоттки в области затвора необходимо напылять под углом, равным $102^{\circ} - 112^{\circ}$, к лицевой поверхности полуизолирующей подложки в сторону истока (смотри рисунок 1-24). В каждой паре электродов исток–сток упомянутый угол в истоковом секторе затвора, отсчитываемый от истока, превышает на $24^{\circ} - 44^{\circ}$ угол в стоковом секторе затвора и одновременно эти углы находятся в плоскости, перпендикулярной направлению ширины канала. При напылении расстояние между лицевой поверхностью полуизолирующей подложки и источником напыляемого металла или системы металлов равно 400 – 700 мм.

Заданную величину угла к лицевой стороне полуизолирующей подложки в сторону электрода истока обеспечивают посредством взаимного и соответствующего расположения лицевой поверхности полуизолирующей подложки и источника напыляемого металла или системы металлов.

Напыление металла или системы металлов, образующих омические контакты в области истока и стока и барьер Шоттки в области затвора осуществляют электронно-лучевым испарением материала источников.

Предложенный способ изготовления ПТШ, обеспечивает воспроизводимое расположение затвора в канавке канала, что в свою очередь в совокупности с тем, что затвор смещен в сторону истока обеспечивает:

во-первых, низкое паразитное сопротивление исток-затвор,
во-вторых, достаточно высокое и воспроизводимое пробивное напряжение сток-затвор.

Совокупность этих результатов свою очередь обеспечивает повышение коэффициента усиления, выходной мощности и, соответственно, коэффициента полезного действия, а так же снижает коэффициент шума.

Кроме того, данный способ обеспечивает воспроизводимость геометрических и электрических параметров ПТШ при их изготовлении.

Напыление металла или группы металлов, образующих барьер Шоттки в затворе, под углом λ в истоковом секторе напыления (смотри рисунок 1-24) менее 102° малоэффективно, а более 112° недопустимо, так как приводит к излишне сильному сдвигу основания затвора в сторону истока и, как следствие, к снижению пробивного напряжения затвор–исток.

Расстояние между лицевой поверхностью полуизолирующей подложки и источником напыляемого металла или группы металлов менее 400 мм не допустимо из-за увеличивающегося разброса угла напыления, приводящего к ухудшению проводимых технологических процессов, а более 700 мм - ограничено возможностями технологического оборудования.

На рисунке 1-24 изображен вариант изготовления ПТШ способом наклонного напыления металлизации затвора. В нем указанную величину угла к лицевой поверхности полуизолирующей подложки в истоковом секторе затвора обеспечивают посредством расположения эпитаксиальной структуры относительно источника напыляемого металла. При этом в каждой паре электродов исток–сток упомянутый угол в истоковом секторе напыления превышает на 34° аналогичный угол в стоковом секторе. Напыление проводится перпендикулярно направлению ширины канала. Расстояние между лицевой поверхностью структуры и источником напыляемого металла или системы металлов равно 500 мм.

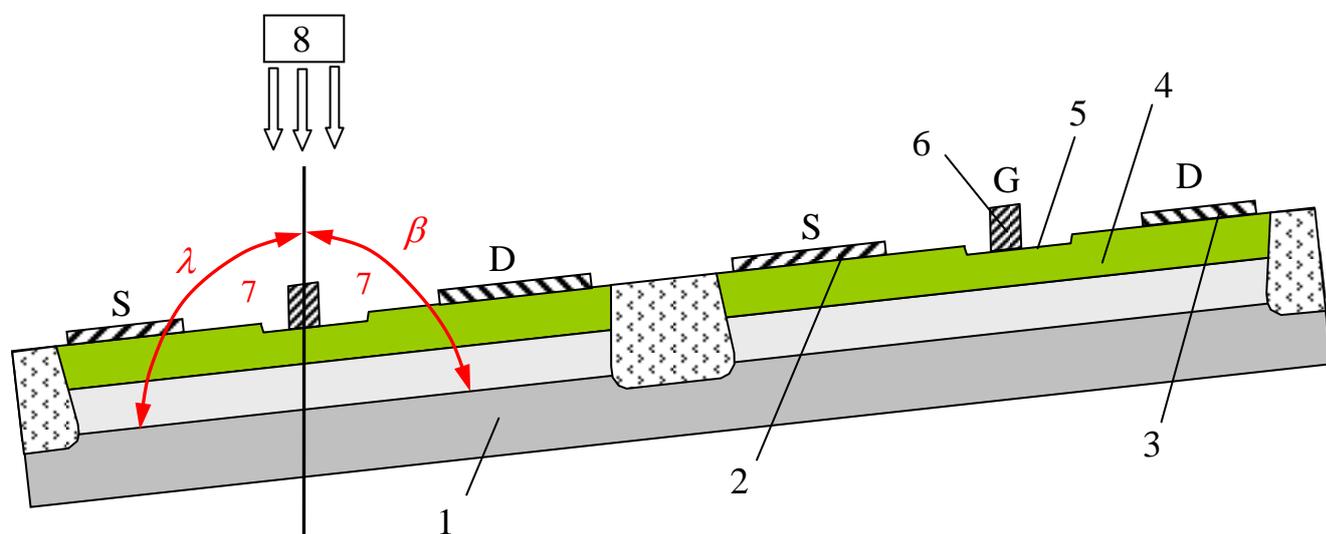


Рис. 1-24. Формирование затвора методом наклонного напыления. 1 - подложка из SI GaAs с эпитаксиальным слоем $n-GaAs$; 2 и 3 - соответственно: электроды истока и стока; 4 - канал, 5 - канавка между истоком и стоком под электродом затвора; 6 - единичная секция затвора; 7 - углы к лицевой поверхности подложки в истоковом и в стоковом секторах напыления (λ и β соответственно); 8 - источник напыляемого металла или группы металлов.

Методом наклонного напыления металлизации затвора был изготовлен ряд транзисторов. ПТШ были выполнены на лицевой поверхности активного слоя $n-GaAs$, выращенного на полуизолирующей подложке из арсенида галлия 1 с

буферным слоем $n^- - GaAs$. Активный слой имел толщину 0,3 мкм, концентрацию легирующей примеси доноров не более $4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Транзистор содержал чередующиеся пары электродов истока 2, стока 3, между ними канал 4 с канавкой 5 под электрод затвора 6.

Ширина канавок равна 1,1 мкм, глубина 0,15 мкм. В канавках 5 расположены единичные секции затвора 6 с длиной не более 0,7 мкм. При этом единичные секции затвора 6 смещены в сторону электрода истока 2.

При изготовлении транзисторов выполнялась следующая последовательность операций:

- на лицевой поверхности полуизолирующей подложки 1, формируют топологию омических контактов посредством процессов литографии,

- далее изготавливают электроды стока и истока 2 и 3 соответственно вакуумным напылением системы металлов золото-германий-никель-золото и одновременно формируют каналы 4 между ними,

- посредством литографии и мелкого травления полуизолирующей подложки арсенида галлия с последующей бомбардировкой ионами бора формируют меза-структуры, непосредственно в которых располагаются элементы конструкции всех секций транзистора,

- посредством формирования в слое резиста рисунка топологии затворов методом ЭЛЛ с последующим травлением активного слоя $n - GaAs$ 4 формируют канавки 5 под электроды затворов, образующих контакт Шоттки,

- формируют электроды затворов, образующих контакт Шоттки 6, для чего ориентируют лицевую поверхность полуизолирующей подложки арсенида галлия относительно источника напыляемого металла или системы металлов, под углом, равным 107° в истоковом секторе затвора, при этом превышение этого угла составляет 34° относительно аналогичного угла в стоковом секторе – 7° и 7° соответственно,

- напыляют систему металлов, образующих контакт Шоттки, например, титан-алюминий-титан,

- формируют рисунок пассивирующего диэлектрика,
- изготавливают «воздушные мосты» и контактные площадки посредством литографии и локального гальванического осаждения золота,
- проводят шлифовку и полировку обратной поверхности полуизолирующей подложки арсенида галлия с уменьшением ее толщины до заданной величины известными методами,
- для подсоединения истоков ПТШ к контакту на нижней поверхности полуизолирующей GaAs подложки выполняют сквозные отверстия химическим или плазмохимическим травлением через окна в маске из фоторезиста, формируемой методом двухстороннего совмещения,
- посредством химического осаждения никеля и гальванического осаждения золота металлизуют нижнюю поверхность полуизолирующей GaAs подложки.

Кроме образцов транзисторов, изготовленных при оптимальном угле напыления металлизации затворов, был изготовлен образцы при величинах угла в истоковом секторе, равных 102° и 112° соответственно и с превышением угла в области затвора, примыкающей к электроду истока равным $7 \lambda - 24^{\circ}$ и относительно аналогичного угла в стоковом секторе $7 \beta - 44^{\circ}$. Расстояние между лицевой поверхностью подложки и источником напыляемой системы металлов равнялось 400 и 700 мм. Также использовались технологические параметры, выходящие из оптимальных пределов.

На изготовленных образцах ПТШ были измерены выходная мощность СВЧ, коэффициент шума, коэффициент усиления по мощности и коэффициент полезного действия. Эти результаты сведены в таблицу 5.

Таблица 5. СВЧ параметры образцов ПТШ с привязкой к характеристикам условий напыления металлизации затвора.

№ п/п	Характеристики процесса формирования затвора ПТШ			Измеренные СВЧ параметры			
	Величина угла λ в истоковом секторе напыления металлизации контакта Шоттки, град.	$(\lambda - \beta)$, град	Расстояние между лицевой поверхностью полуизолирующей подложки и источником напыляемого металла, мм	K_y , дБ	$P_{\text{вых}}$, мВт	КПД, %	$K_{\text{ш}}$, дБ
1	107	34	550	9,8	750	38	2,1
2	102	24	400	10	750	40	2,0
3	99	22	350	8,0	500	27	2,6
прототип	99	-	350	9,0	450	30	-

В таблице 5 обозначено: K_y - коэффициент усиления; $P_{\text{вых}}$ - выходная СВЧ мощность; $K_{\text{ш}}$ - коэффициент шума.

Согласно таблице 5, образцы ПТШ, изготовленные предложенным способом (№ образцов 1-3 в таблице 5) обладают достаточно высокой выходной мощностью ≈ 750 мВт, высоким коэффициентом усиления по мощности ≈ 10 дБ, высоким коэффициентом полезного действия $27 \div 40\%$, низким коэффициентом шума, в отличие от образцов ПТШ (№ 4-5 в таблице 4), изготовленных с технологическими параметрами, выходящими за оптимальные пределы.

Таким образом, предложенный способ изготовления СВЧ полевого транзистора с управляющим электродом в виде простейшего несоставного контакта Шоттки, у которого каждая одиночная секция затвора имеет трапецевидную форму поперечного сечения, позволяет повысить:

- во-первых, выходную мощность примерно на 25 процентов,
- во-вторых, коэффициент усиления по мощности примерно на 2–2,5 дБ,
- в-третьих, коэффициент полезного действия примерно на 7–10 процентов,

в-четвертых, снизить коэффициент шума примерно 0,3–0,5дБ.

Более того, следует особенно отметить, что предложенный способ позволяет успешно применять его для изготовления как малошумящих, так и мощных СВЧ полевых транзисторов с контактом Шоттки.

По описанной технологии был изготовлен ряд мощных транзисторов [91-92]

Типичные ВАХ транзистора с многосекционным затвором, имеющим длину основания 0,5 мкм и суммарную ширину всех секций затвора 1200 мкм (0,5×1200 мкм) показаны на рисунке 1-25.

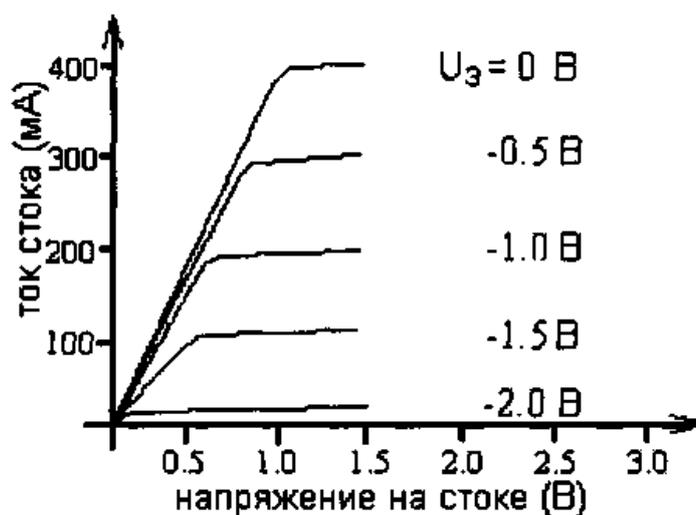


Рис. 1-25. Типичные ВАХ транзистора с затвором 0,5×1200 мкм.

Образцы транзисторов с ВАХ, представленными на рисунке 1-25, имеют низкое напряжение насыщения (около 1 В) и максимальную внешнюю крутизну 170 мСм/мм. Пробивное напряжение сток-затвор равно 16 В, исток-затвор 8 В.

СВЧ параметры ПТШ 0,5×1200 мкм ($f = 15$ ГГц; $I_{dss} = 400$ мА) и параметры рабочих точек (I_d , U_d), в которых проведены измерения, приведены в таблице 6.

Таблица 6. СВЧ параметры на частоте 15 ГГц и рабочие точки образцов ПТШ с несоставным затвором 0,5×1200 мкм

Рвх, мВт	Рвых, мВт	G, дБ	Id, мА	Ud, В	η, %
15.2	100	8.2	193	7.0	6.3
53.2	350	8.2	200	7.0	21
72	450	8.0	205	7.0	26
82.5	500	7.8	206	7.0	29
115.5	600	7.2	210	7.0	33

На рисунке 1-26 показаны типичные зависимости выходной СВЧ мощности и КПД от величины СВЧ мощности, подаваемой на вход ПТШ с несоставным затвором $0,5 \times 1200$ мкм.

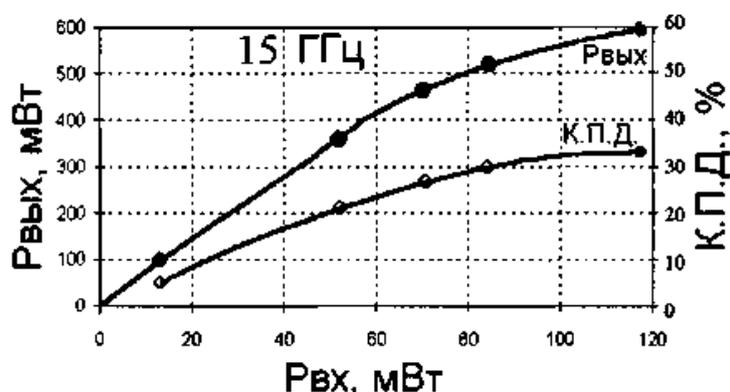


Рис. 1-26. Зависимости выходной СВЧ мощности и КПД от СВЧ мощности, подаваемой на вход ПТШ с несоставным затвором $0,5 \times 1200$ мкм.

В таблице 7 представлены СВЧ параметры ПТШ с различной периферией многосекционного несоставного затвора, изготовленных по описанной технологии на основе простейших вариантов конструкции эпитаксиальных структур вида $n-GaAs$ /нелегируемый буфер/ $SI-GaAs$ подложка.

Таблица 7. СВЧ параметры ПТШ с различными вариантами параллельного соединения одиночных секций несоставного затвора.

Общая ширина затвора, (количество секций \times ширина в мкм затвора в одной секции)	$P_{1дБ}$, мВт	$G_{1дБ}$, дБ	Рабочая точка $I_{DS} \times U_{DS}$, мА \times В	f , ГГц	КПД, %
1200 (18 \times 66)	600	7.0	200 \times 7	15	30
2200 (18 \times 120)	900	7.0	300 \times 7	12	35
4000 (32 \times 125)	2100	8.0	600 \times 8	8	37

Испытания на долговечность, проведенные в составе усилителей мощности показали, что средняя наработка до отказа составляет 10^7 часов.

1.4. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С Г- ОБРАЗНЫМ ЗАТВОРОМ

В полевых транзисторах СВЧ важнейшим элементом является затвор, практически всегда формируемый в виде параллельного соединения множества одиночных элементов (секций). В СВЧ транзисторах особенно часто используется затвор, контактирующий непосредственно с поверхностью полупроводника (без промежуточного слоя диэлектрика) и формирующий потенциальный барьер контакта Шоттки. От конструкции, размеров, геометрической формы затвора (в том числе и от формы поперечного сечения каждого одиночного элемента затвора) сильно зависят параметры транзистора. Длина основания затвора L_3 , формируемого непосредственно в плоскости контакта Шоттки, определяет важнейшие динамические параметры транзистора, такие, как максимальная частота усиления по мощности F_{\max} , а также коэффициент усиления и коэффициент шума на заданной частоте. Давно известно, что СВЧ параметры транзистора улучшаются с уменьшением длины основания затвора, однако это улучшение может быть слабым, если не учесть ряда сопутствующих физических эффектов.

Действительно, в обычном затворе при уменьшении длины L_3 уменьшается площадь поперечного сечения одиночных элементов затвора, что приводит к росту их продольного сопротивления и, следовательно, из-за потерь СВЧ-сигнала в затворной металлизации, к ухудшению усиления и шумовых характеристик. Для того чтобы снизить это сопротивление затворной металлизации, изготавливают затвор с Г-образным, или «грибовидным» поперечным сечением: с узкой нижней частью затвора (ножка затвора) и с широкой верхней частью (шляпка затвора). Такая составная конструкция затвора одновременно обеспечивает и малую длину основания ножки затвора L_3 , которая непосредственно контактирует с поверхностью полупроводника и за счет введения в конструкцию затвора его шляпки - малое продольное сопротивление каждой секции затвора.

1.4.1 Технология Т - образного затвора

В правильно спроектированном затворе введение шляпки не должно приводить к увеличению длины участка канала, на которой происходит управление проводимостью канала (полевой эффект), т.к. этот эффект эквивалентен увеличению длины основания ножки затвора и ухудшает параметры транзистора. В плане эффективного управления проводимостью канала идеален затвор с трапециевидной формой сечения каждой из его секций, но он имеет сравнительно большое сопротивление в направлении длины секций. В составном затворе, при фиксированной высоте ножки затвора и фиксированной длине ее основания, из-за проявления существенного полевого эффекта под шляпкой, оказывается невозможным сильно увеличить длину затвора в области шляпки и, тем самым, сильно снизить сопротивление затворной металлизации.

Понятно, что при понижении сопротивления составного затвора за счет увеличения длины затвора в области шляпки, большее преимущество имеют затворы, отличающиеся большей высотой ножки – ослабляется полевой эффект в канале под шляпкой. Такие затворы позволяют существенно улучшить параметры транзисторов, но более сложны в технологическом плане, что станет понятным из дальнейшего описания их технологии.

С целью снижения паразитного электрического сопротивления затвора обычно используют известное и широко применимое на сегодня решение, заключающееся в том, что электрод затвора полевого транзистора с контактом Шоттки изготавливается в виде «гриба» или буквы «Т». Технология изготовления грибовидного затвора довольно сложна и использует трехслойные и четырехслойные системы резистов со сложным профилем боковых стенок [95-96].

Для формирования составного Т-образного затвора с субмикронными размерами длины его основания L_3 используется более сложная технология с применением электронной литографии и многослойных фото и электронорезистов (ФР и ЭР) (до четырех слоёв) на операциях литографии для формирования затвора. Процесс электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ)

обеспечивается современным, достаточно дорогостоящим, но уже весьма высокопроизводительным оборудованием. Современное оборудование для ЭЛЛ в настоящее время уже позволяет обеспечить не только возможность оперативной перестройки при изготовлении множества вариантов изделий разного типа (мелких серий), но и обеспечить по производительности потребности крупносерийного производства однотипной продукции.

Основные этапы и принципы технологии формирования затвора с Т-формой поперечного сечения, показаны на рисунке 1-27.

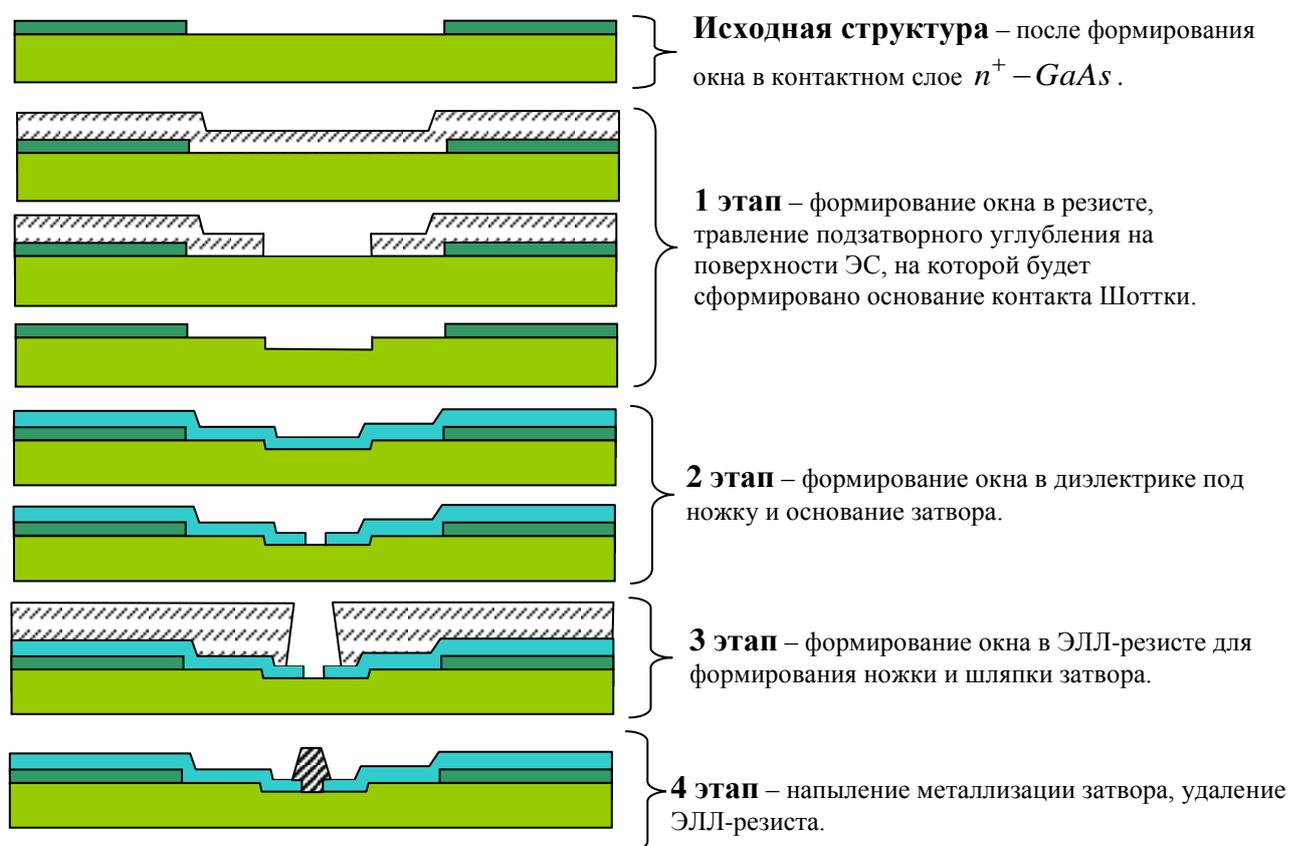


Рис. 1-27. Основные этапы формирования Т-образного затвора методом ЭЛЛ при использовании однослойного электронорезиста (ЭР).

На рисунке 1-27 показан один из простых вариантов последовательности формирования Т-образного затвора. Длина формируемого затвора зависит от разрешающей способности литографического оборудования и прецизионности травления диэлектрического слоя. Точность позиционирования затвора между истоком и стоком транзистора определяется многими факторами. В частности, в

числе прочих важна точность совмещения при процессах литографии (определяется возможностями оборудования). Большую важность имеет воспроизводимость процессов вскрытия поверхности слоя, на котором формируется основание затвора, образующее контакт Шоттки (обязательно без внесения дефектов в этот слой!), травления диэлектрического слоя на 2 этапе (тоже без внесения дефектов в нижележащий слой полупроводника!), проявления резистов.

1.4.2 Технология Г-образного затвора

Таким образом, совокупность конструктивно-технологических проблем, которые необходимо выявить и решить для воспроизводимого формирования затворов высокого качества, представляет собой достаточно сложную задачу. В ее решение входит решение следующих весьма сложных частных задач.

1. Решение задачи достаточно точного трехмерного моделирования работы многоэлементного затвора проводимое с привязкой к конструкции транзистора, как в статическом режиме, так и на СВЧ.

2. Выбор конструкции, геометрии и соотношения размеров затвора. Проблема этого выбора существенно упрощается при успешном решении предыдущей задачи

3. Разработка технологии сквозного травления сравнительно толстых слоев диэлектрика при точном воспроизведении субмикронных размеров элементов и обязательно без внесения дефектов в нижележащий слой полупроводника.

Нами был разработан способ изготовления затворов транзистора [97], в котором для получения затворов с малой длиной основания (на уровне 0,1 мкм) используется не высокая разрешающая способность оборудования, а возможность оборудования точно совмещать топологию слоев, формируемых на последовательных этапах литографии. В этом способе используется маска, состоящая из двух слоев резистов разных типов, которые могут иметь различные толщины. Этот способ формирования затвора транзистора может быть

осуществлен как с помощью электронно-лучевой литографии, так и с помощью проекционной фотолитографии.

Первая идея разработанного нами способа заключается в том, что форма поперечного сечения затвора не обязательно должна быть симметричной, поскольку при формировании затвора наиболее важно получение заданной длины основания затвора и низкого сопротивления верхней части затворной металлизации (шляпки затвора).

Вторая идея заключается в том, что размер вскрытой области в фоторезистивной маске может быть сравнительно большим – равным размеру верхней части (шляпки) затвора. Малая длина основания затвора и фиксация положения истокового края основания могут быть обеспечены с помощью края ступеньки из диэлектрика. Другим краем маски, задающим положение стокового края основания затвора, служит фоторезистивная маска (смотри рисунок 1-28).

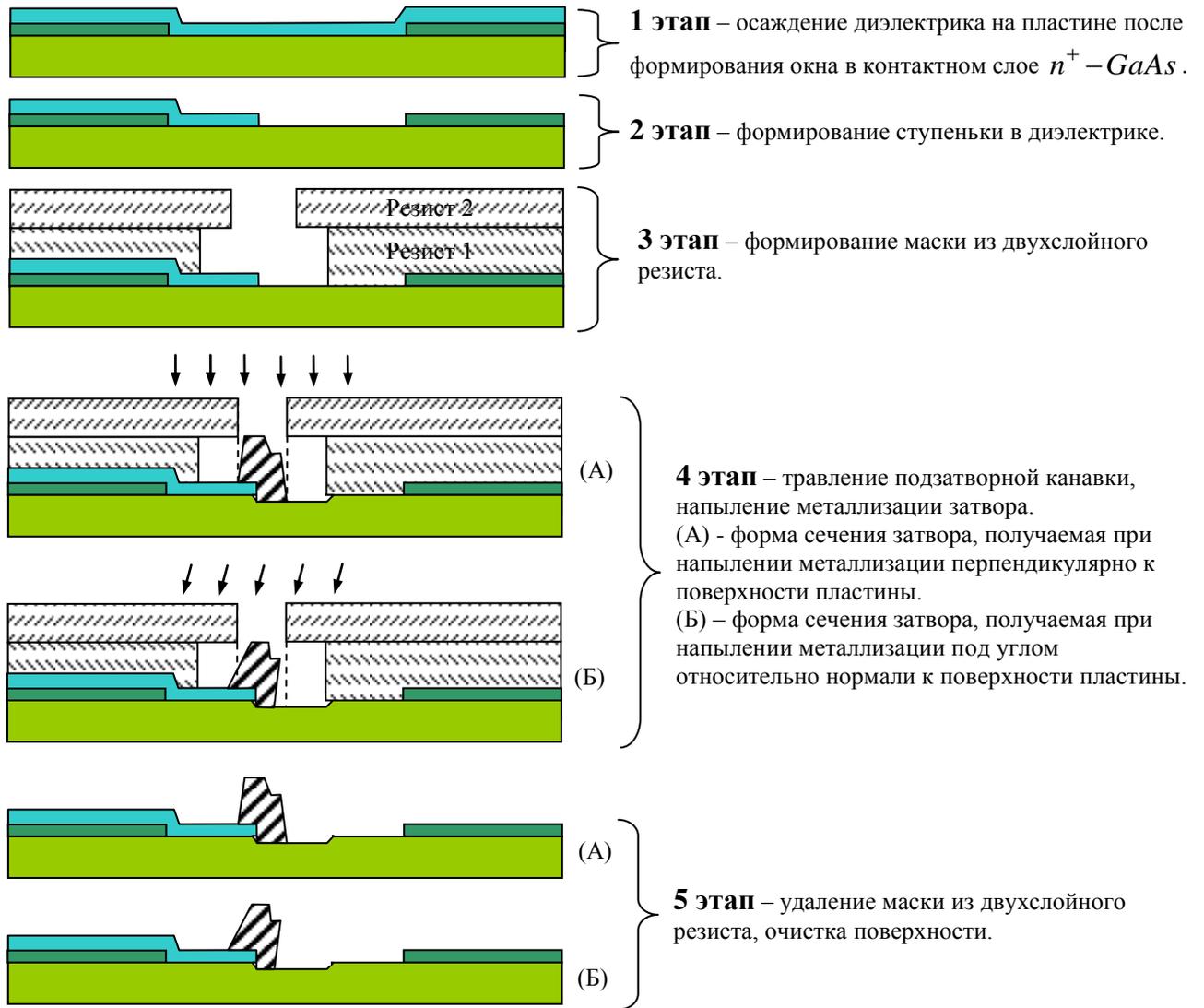


Рис. 1-28. Идея формирования Г-образного затвора методом фотолитографии с двухслойным резистом.

При этом способе применяется маска из двухслойных резистов, причем даже при формировании основания затвора с субмикронной длиной могут быть использованы фоторезисты. При формировании собственно затвора может быть использовано как напыление металлов перпендикулярно поверхности пластины, так и напыление под углом относительно нормали к поверхности пластины, так, как показано на рисунках 1-28, 1-29.

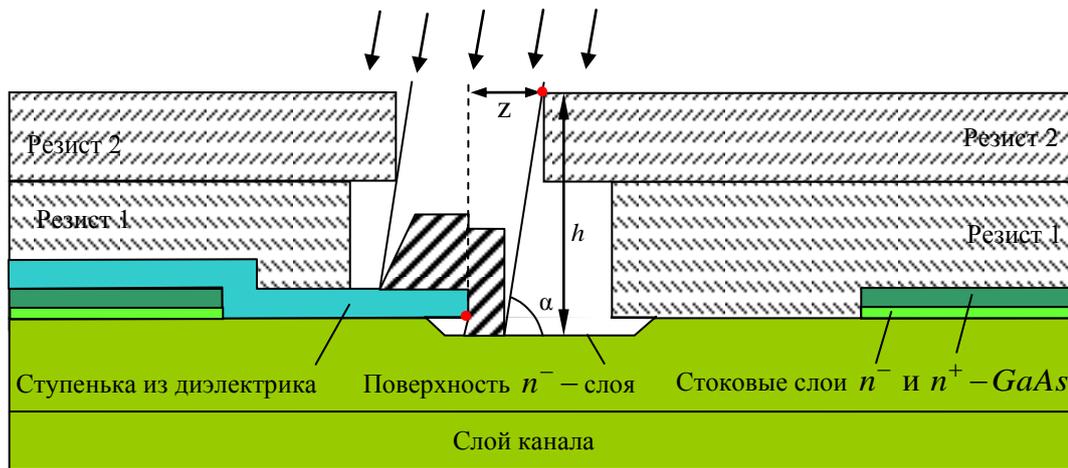


Рис. 1-29. Особенности формирования затвора при напылении слоя его металлизации под углом α . Красными точками помечены края слоев, определяющих ровность краев основания затвора.

На рисунке 1-29 видно, что длина основания затвора будет определяться величиной зазора z между ступенькой из диэлектрика и противоположным краем фоторезистивной маски, которые формируются с помощью двух последовательных литографий, и, следовательно, этот размер будет определяться соответствующим размером, заложенным в фотошаблонах для двух последовательных фотолитографий или в программе ЭЛЛ экспонирования. Кроме того видно, что напыление затворной металлизации под углом позволяет дополнительно уменьшить длину основания затвора за счет теневого эффекта, создаваемого верхним слоем резиста 2.

Длина основания затвора может быть определена из формулы:

$$L_g \cong z - h \cdot \text{ctg} \alpha, \quad (1-2)$$

где z – расстояние (зазор) между краем диэлектрической ступеньки и противоположным краем резистивной маски; h – размер, практически совпадающий с суммарной толщиной двух слоев резиста, поскольку глубина подзатворного углубления много меньше толщины слоев резиста; α – угол между потоком напыляемого металла и поверхностью полупроводниковой пластины.

Из формулы (1-2) видно, что величину L_g можно уменьшить, увеличивая толщину фоторезистивной маски и уменьшая угол α . Очевидно, что при некоторых значениях величин h и α длина затвора может обратиться в ноль.

Как видно из рисунка 1-29, реальная длина затвора оказывается немного увеличенной из-за наличия заглабления в n^- -слоя полупроводника и эффекта бокового переноса металла под край диэлектрической ступеньки. Увеличение « x » может быть рассчитано по формуле:

$$x = h_1 \cdot \operatorname{ctg} \alpha, \quad (1-3)$$

где h_1 – величина заглабления в n^- -слой полупроводника.

По формуле (1-3) можно оценить длину затвора, которую можно реально получить, используя напыление металлизации затвора под углом. Если принять для расчетов величину зазора z равной 0,5 мкм, общую толщину резиста считать равной величине $h = 1,1$ мкм, а угол $\alpha = 80^\circ$ (отклонение от нормали 10°), то расчетная длина основания затвора будет равной 0,31 мкм.

Таким образом, видно, что за счет напыления под углом 80° длину основания затвора можно уменьшить почти на 0,2 мкм при типичных величинах толщин слоев резистов. Также интересно оценить увеличение длины затвора из-за нависания ступеньки из диэлектрика над подзатворным углублением. В транзисторах на гетероструктурах величина заглабления в n^- -полупроводник h_1 при использовании химического травления в наихудшем случае может составлять весьма большую величину: 0,05...0,10 мкм. Несмотря на это (смотри выражение (1-3)), максимум величины x составит всего лишь не более 0,02 мкм ($x = 0,1 \cdot 0,176 = 0,0176$ мкм).

Как отмечалось выше, метод формирования Г-образного затвора основан на совмещении двух формируемых последовательно слоёв. Поэтому возникает вопрос, а насколько точно будет воспроизводиться величина z по площади рабочей пластины и от пластины к пластине? Каков будет разброс этой величины? На эту величину будут влиять ряд факторов случайного происхождения, такие, как контрастность меток совмещения, отклонение параметров системы считывания меток, отклонение параметров системы управления движением стола установки.

Из теории вероятности известно, что многие случайные величины, например, такие, как ошибки при измерениях, боковое отклонение и отклонение

по дальности точки попадания от некоторого центра при стрельбе, величина износа деталей во многих механизмах и т. д., имеют плотность распределения вероятности, определяемую формулой: $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$.

В этом случае случайная величина подчинена нормальному закону распределения (распределение по закону Гаусса).

В этой формуле величина x – это отклонение от максимума распределения (математического ожидания), в нашем случае это отклонение от «0», σ – среднее квадратичное отклонение. При проведении практических вычислений, за единицу измерения отклонения случайной величины, подчиненной нормальному закону, от её центра рассеяния (математического ожидания) принимают среднее квадратичное отклонение σ .

Из нормального распределения следует правило трех сигм:

$$p(-\sigma \leq x \leq \sigma) = 0,683, \quad p(-2\sigma \leq x \leq 2\sigma) = 0,954, \quad p(-3\sigma \leq x \leq 3\sigma) = 0,997.$$

В выражениях, приведенных выше: p – вероятность попадания величины отклонения в соответствующий диапазон.

Из вида этих выражений следует, что почти достоверно то, что случайная величина не отклонится от математического ожидания по абсолютной величине больше чем на 3σ , т. к. вероятность попадания в диапазон $\pm 3\sigma$ составляет 0,997.

Изготовители оборудования для проекционной литографии в спецификациях приводят величину точности совмещения. Для современного оборудования эта величина составляет порядка 0,06 мкм по $\pm 3\sigma$, это означает, что 99,7 % всех совмещенных структур будут иметь рассовмещение не более ± 60 нм, 95,4 % всех структур – не более ± 40 нм, 68,3 % – не более ± 20 нм.

Для большей части затворов с длиной основания 0,3 мкм отклонение от этой заданной величины не будет превышать ± 10 %. Кроме того, длина основания затвора L_g при напылении под углом существенно зависит от суммарной толщины слоев резиста h (смотри рисунок 1-29).

Современное оборудование для экспонирования и технология нанесения слоев резистов позволяют формировать их толщины с точностью не хуже чем $\pm 0,05$ мкм. Например, если толщина резиста h отклонится на 0,1 мкм от заданной величины 1,1 мкм, т. е. величина h составит 1 мкм, тогда длина основания затвора станет равной 0,324 мкм, т. е. увеличится примерно на 0,014 мкм.

Из последней оценки следует, что при напылении металлизации затвора под углом наклона 80° изменения длины основания затвора не превышают 0,015 мкм, что существенно ниже, чем отклонения из-за неточности совмещения. При нормальном напылении (угол наклона 90°) зависимости длины основания затвора от суммарной толщины резиста нет.

Таким образом, вышеприведенные оценочные расчеты показывают, что способ изготовления затворов транзисторов с использованием двух последовательных фотолитографических процессов и нескольких (при процессе «взрывной» литографии по металлизации затвора) разнородных слоев резистов в качестве маски, может быть реализован на практике.

Для практической реализации предложенного способа формирования затвора вначале были разработаны процессы: плазмохимического осаждения диэлектрического слоя нитрида кремния Si_3N_4 толщиной 0,15 мкм, процесс фотолитографии и процесс последующего травления этого диэлектрического слоя для формирования ступеньки диэлектрика. Далее был отработан процесс формирования двухслойной маски из фоторезистов. В результате проведенных экспериментов было выяснено (рисунок 1-30), что двухслойная маска из резистов PMGI SF9 и AZ7905 позволяет получить наибольшую воспроизводимость размеров и лучшую точность совмещения.

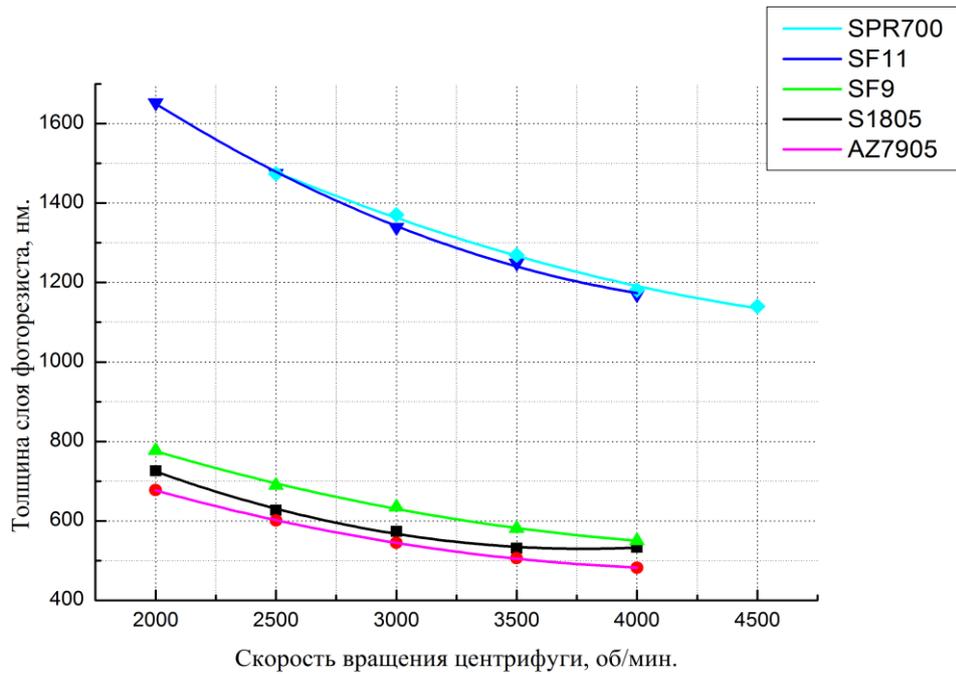


Рис. 1-30. Зависимости толщин слоев резистов различных марок, формируемых при их нанесении, от скорости вращения центрифуги.

В результате проведенных экспериментов выбор был остановлен на использовании резистов марок PMGI SF9 и AZ7905.

Комплекс отработанных процессов позволил внедрить данный метод в производство МИС СВЧ. Для изготовления затворов использовалась установка пошагового экспонирования (степпер) NSR-2005i9C, характеристики которой приведены ниже в таблице 8.

Таблица 8. Основные характеристики степпера NSR-2005i9C.

Масштаб переноса изображения	5:1
Мультиплицирование	шаговое, последовательное
Разрешение,	не хуже 0,45 мкм
Длина волны актиничного света	365 нм (<i>i</i> -линия ртутной лампы)
Максимальная экспонируемая площадка	20×22 мм
Диаметр пластин	76 и 100 мм (два порта)
Ошибка совмещения	не более 0,09 мкм (отклонение 3σ)
Ошибка совмещения (при экспонировании нижележащего слоя на другой установке той же модели)	0,09 мкм (отклонение 3σ)

Напыление затворной металлизации проводилось в направлении нормали к поверхности пластин.

1.4.3 Характеристики приборов на основе транзисторов с Г-образным затвором

Для апробации описанной выше технологии формирования затворов были изготовлены по несколько десятков пластин МИС СВЧ, таких, как пятиразрядный аттенюатор М44712, четырехразрядный фазовращатель М44149-1-2, переключатель М44149-1-2.

В качестве доказательства перспективности технологии Г-затвора, в таблице 9 представлен выход годных приборов для аттенюаторов и фазовращателей. Расчет выхода годных (в %) проводился по десяти пластинам (всего 40 пластин), выбранным подряд из производственного процесса за один период времени. МИС с обычным трапециевидным затвором изготавливались с помощью электронной литографии на установке ZBA-21.

Таблица 9. Выход годных аттенюаторов и фазовращателей.

Тип изделий	Трапециевидный затвор	Затвор Г-образной формы	Увеличение выхода годных, %
Аттенюатор	80,5%	90,9%	10,4
Фазовращатель	71,3%	77,6%	6,3

Выход годных определялся по результатам зондовых измерений СВЧ- и НЧ-параметров на пластине. Из представленных данных (смотри таблицу 9) видно, что, даже при достаточно высоком выходе годных в технологии, выбранной для сравнения, при внедрении новой технологии удастся дополнительно увеличить выход годных на 6...10 %.

Интересно отметить, что выход годных изделий на лучшей пластине с Г-образным затвором составил 97,8 %.

Установлено, что увеличение выхода достигнуто за счет большего размера окна в маске двухслойного резиста, которое лучше вскрывается при проявлении (улучшается удаление остатков резиста из окна), а также за счет более воспроизводимого и равномерного травления подзатворного углубления.

На рисунке 1-31 представлено изображение, полученное в сканирующем электронном микроскопе, на котором показан вид сверху фрагмента затвора, напыленного под прямым углом с напуском истоковой части шляпки затвора на ступеньку из диэлектрического слоя рисунок 1-28(А).

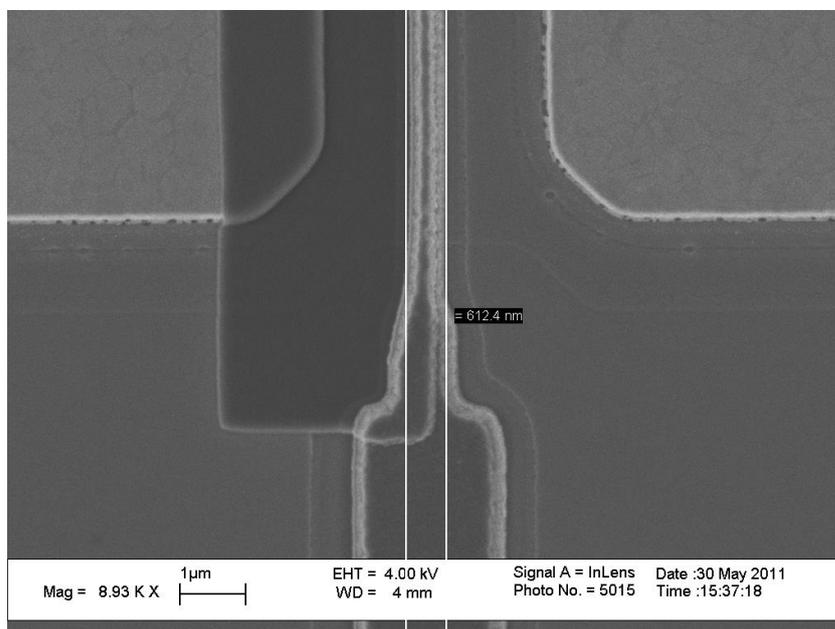


Рис. 1-31. Вид сверху на одиночную секцию затвора. Металлизация затвора формировалась напылением под углом 90° к поверхности пластины.

Данный способ также использовался для изготовления мощных транзисторов. Применялось напыление затворной металлизации под углом

(рисунок 1-28(Б)). На рисунке 1-32 представлено изображение, полученное в сканирующем электронном микроскопе, на котором показан вид сверху фрагмента металлизации затвора, напыленной под углом 74° к поверхности пластины с напуском истоковой части шляпки затвора на ступеньку из диэлектрического слоя.

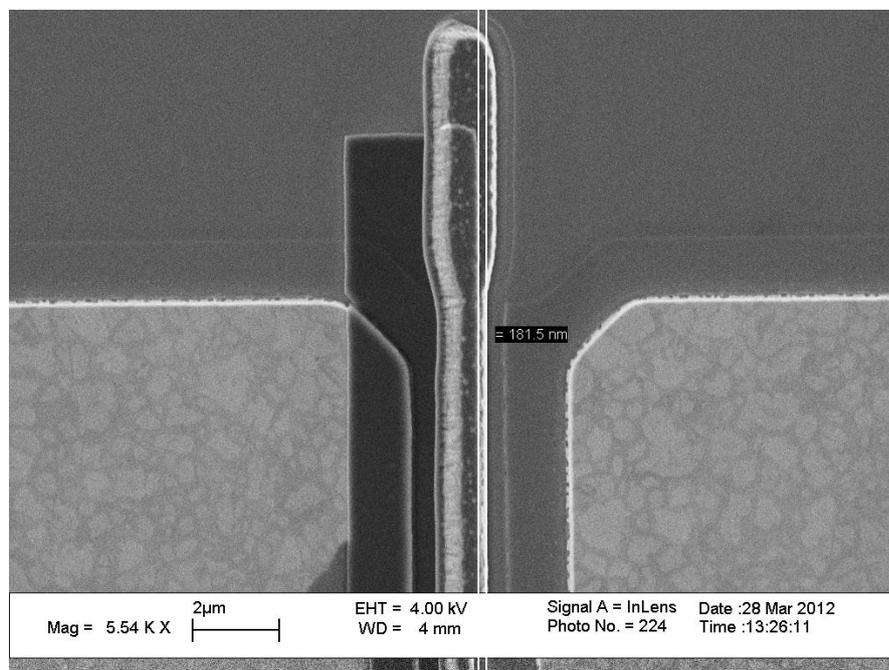


Рис. 1-32. Вид сверху на одиночную секцию затвора. Металлизация затвора формировалась напылением под углом 74° к поверхности пластины.

На рисунке 1-33 показаны дефекты, которые могут сопровождать процесс формирования затвора при химическом травлении удаляемого стоп-слоя (щелевое подтравливание по этому слою показано зеленой стрелкой) и химическом травлении подзатворной канавки (щелевое подтравливание под ступеньку диэлектрика показано белой стрелкой, карман – желтой стрелкой).

Формирование подзатворной канавки необходимо для удаления части n^- слоя полупроводника (смотри рисунок 1-29), который может быть сильно насыщен дефектами, введенными в процессе проведения операции плазмохимического травления при формировании ступеньки из диэлектрика. По этой причине подзатворную канавку часто формируют методом химического травления, который из-за «мягкости» этого процесса принципиально не вводит дефекты. Однако химическое травление не позволяет долговременно и с высокой

точно воспроизводить глубину подзатворной канавки без введения в эпитаксиальную структуру специального стоп-слоя, на котором останавливается процесс химического травления подзатворной канавки. Конечно, перед формированием затвора приходится удалять стоп-слой. Важно отметить, что современные технологии молекулярно-лучевой и газофазной эпитаксии, широко применяющиеся для изготовления транзисторных структур, существенно превосходят по точности и воспроизводимости параметров слоев непосредственно сами транзисторные технологии [98]. В частности, в конструкциях гетероструктур успешно используются функциональные элементы, имеющие толщину всего в несколько монослоев.

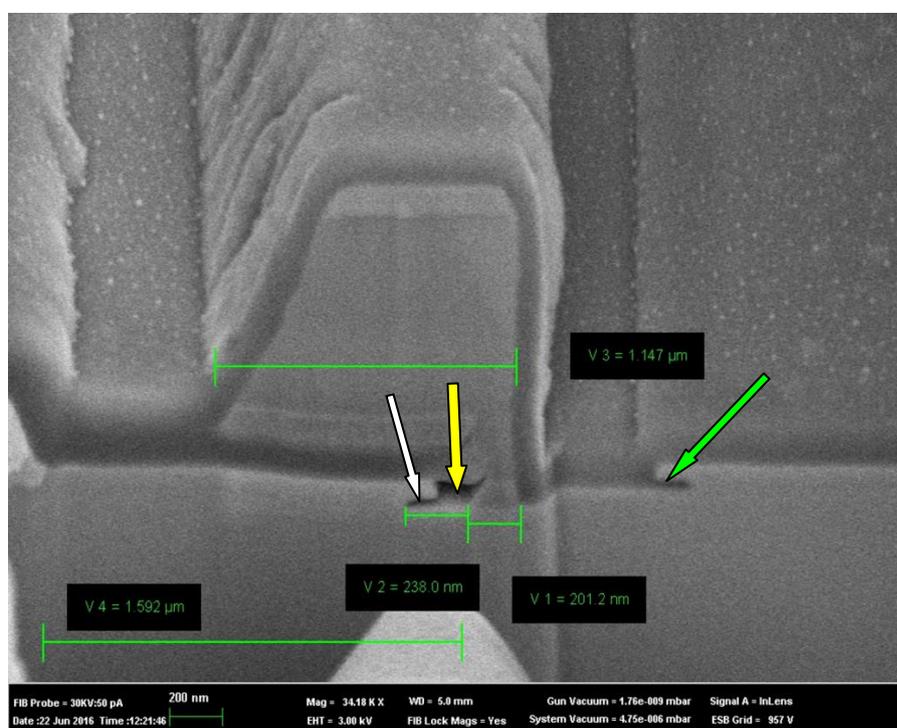


Рис. 1-33. Поперечное сечение затвора, покрытого защитным слоем диэлектрика. Показана возможность изготовления затвора с длиной основания 0,2 мкм методом оптической литографии при наклонном напылении.

Для устранения этого разрыва в возможностях технологий, часто просто необходима замена технологии химического травления на более прецизионную технологию – технологию плазмохимического травления (ПХТ), в которой для предотвращения образования дефектов в нижележащих слоях проводится уменьшение энергии ионов перед окончанием процесса травления. Уменьшение

энергии проводится до таких величин, при которых образование даже точечных дефектов перестает происходить. Такой способ ПХТ позволяет обеспечить приемлемо высокую производительность процесса травления и устранить процесс плазменного формирования дефектов под дном подзатворного углубления. Использование такой технологии имеет ряд преимуществ:

1. Поскольку генерация дефектов устранена, необходимость химического травления для изготовления подзатворной канавки в принципе, пропадает.
2. Устраняется эффект щелевого вытравливания дефектов, показанных белой и зеленой стрелками на рисунке 1-33.
3. Из-за образования слоя $AlCl_3$ процесс плазмохимического травления слоев n^+ и n^- - GaAs легко останавливается (на этом слое) при вскрытии поверхности нижележащего слоя $Al_xGa_{1-x}As$ даже при малых величинах « x » ($x \ll 0,25$). Поэтому исчезает необходимость формирования стоп-слоя в эпитаксиальной структуре.

На рисунке 1-34 показано поперечное сечение затвора. Подзатворное углубление формировалось методом ПХТ с уменьшением энергии ионов.

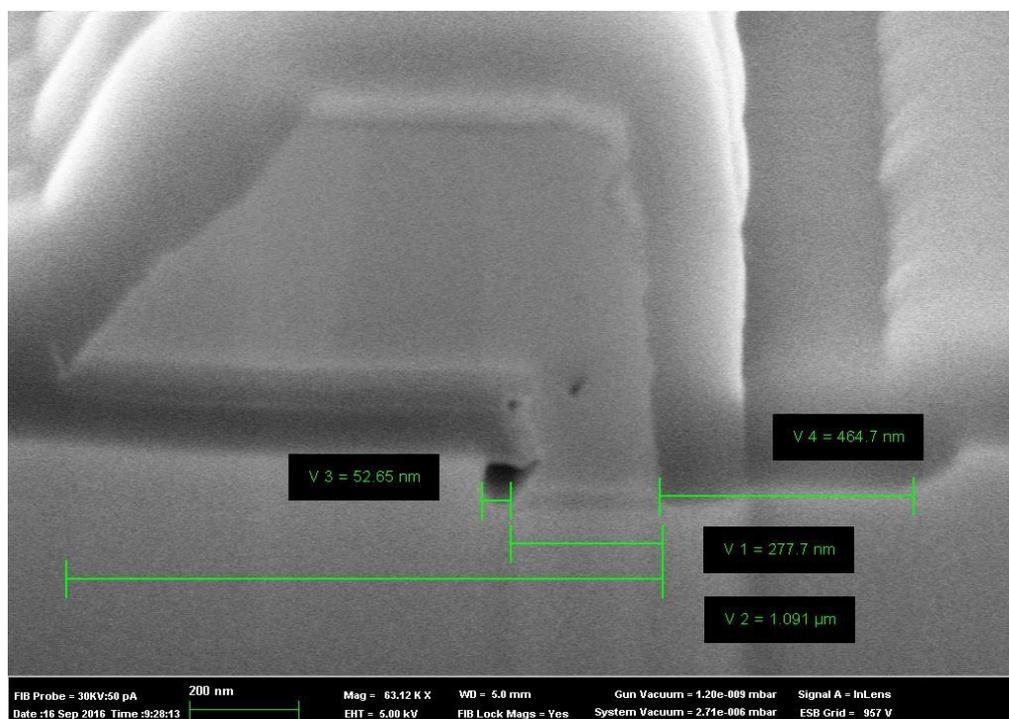


Рис. 1-34. Изображение поперечного сечения затвора, формируемого при использовании плазмохимической технологии с уменьшением энергии ионов в конце процесса травления.

Видно, что такая технология позволит существенно уменьшить размер карманов под шляпкой затворов и устранить эффект формирования щелей под ступенькой диэлектрика и стоковым контактном слое $n^- - GaAs$. Показан случай, когда сохранено формирование подзатворной канавки.

Другим вариантом использования Г-образного затвора является предварительное формирование подзатворной канавки с последующим формированием ступеньки из диэлектрика, т.е. так, как показано на рисунке 1-35.

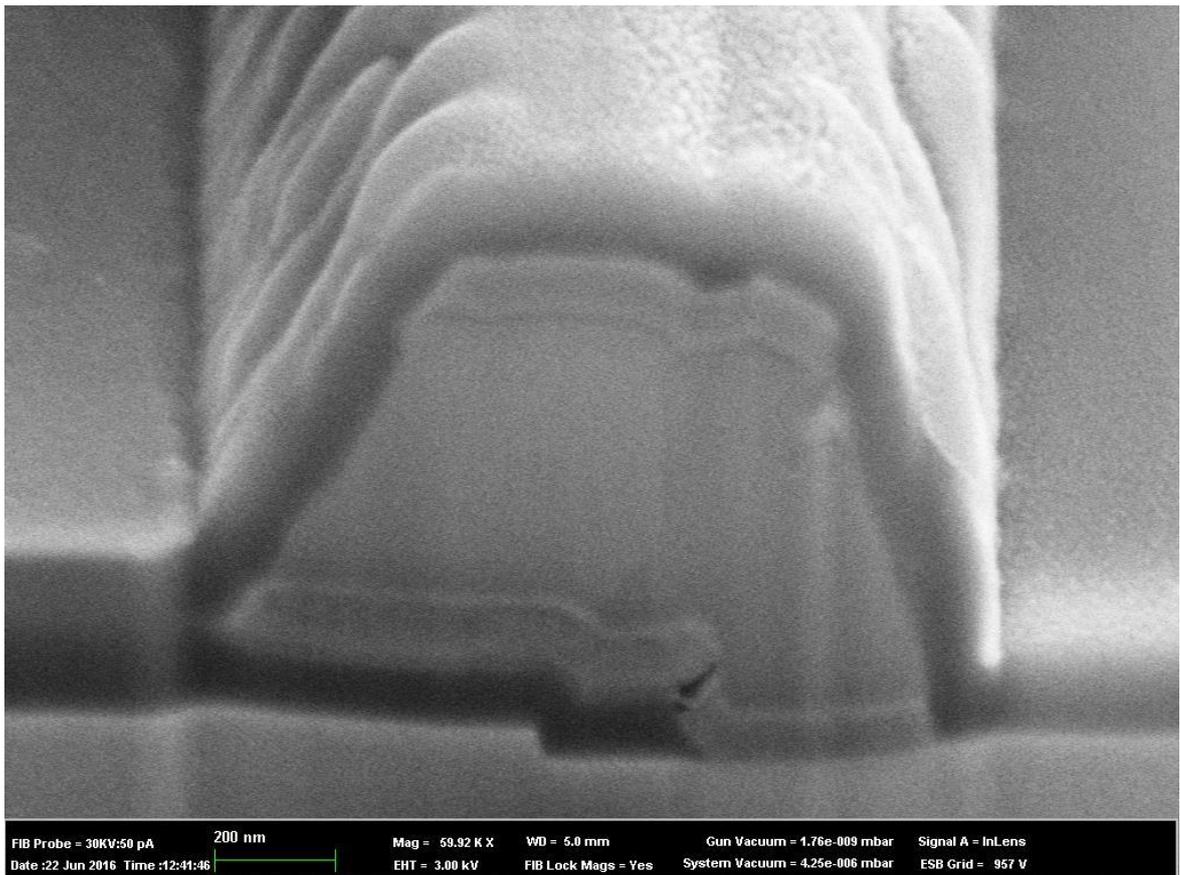


Рис. 1-35. Изображение поперечного сечения секции затвора, сформированной при вытравливании подзатворной канавки перед формированием ступеньки диэлектрика.

По предложенной методике формирования затвора с наклонным напылением металлизации был изготовлен ряд полевых транзисторов. На рисунке 1-36 приведена фотография бокового скола такого транзистора, сделанная на электронном микроскопе. Видно, что реальная форма затвора транзистора почти в точности повторяет форму, приведенную на рисунке 1-34. Из сравнения размеров

основания ножки затвора с размером масштабной линейки можно сделать вывод, что длина той части затвора транзистора, которая контактирует непосредственно с полупроводниковой структурой, составляет величину, примерно равную $0.09 \div 0,11$ мкм, что намного меньше характерного разрешения используемой литографии (около 0,45 мкм).

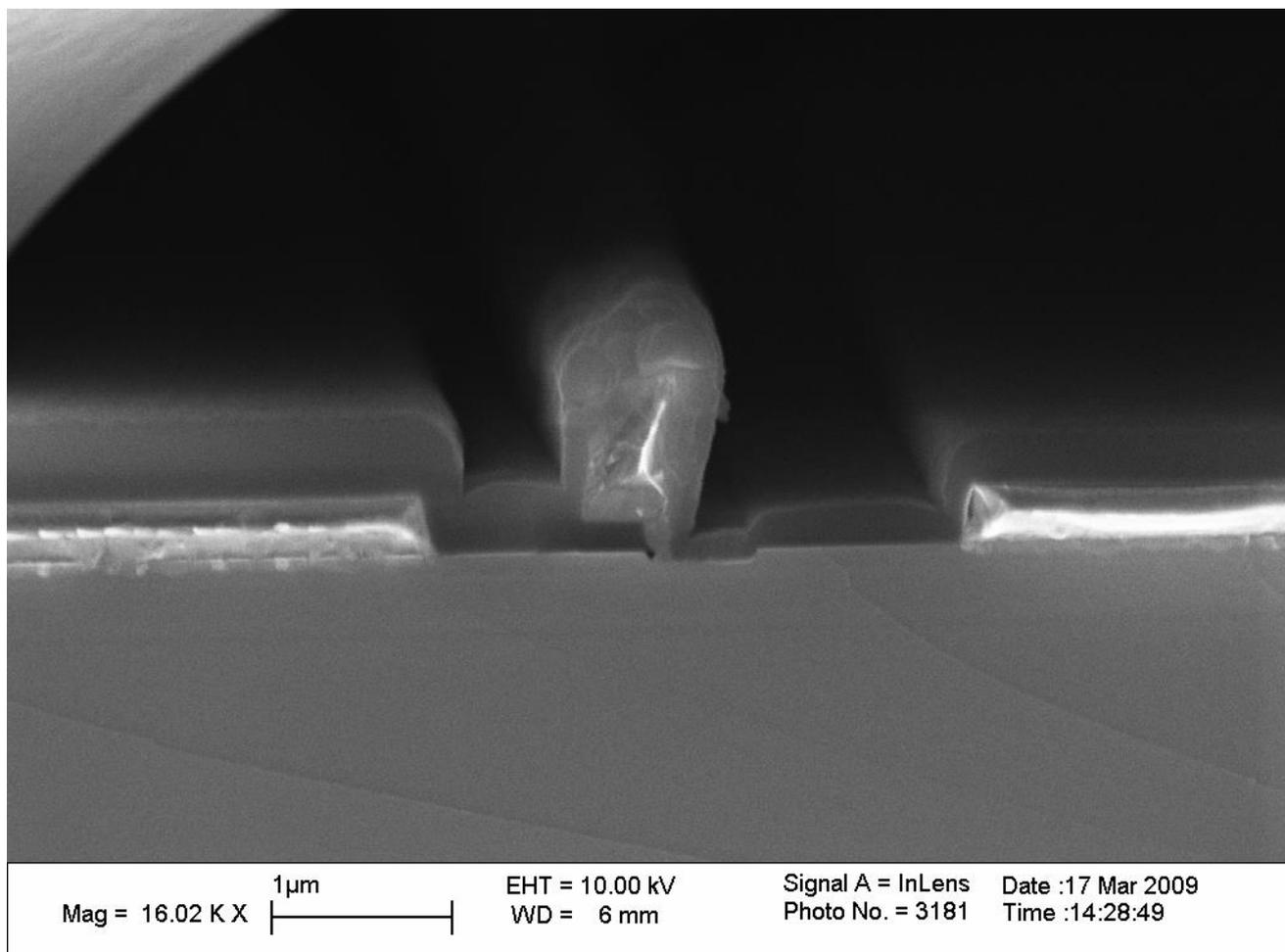


Рис. 1-36. Поперечное сечение секции Г – образного затвора транзистора с минимизированной длиной основания.

Характерные размеры сечения шляпки Г-образного затвора составляют примерно $0,5 \times 0,5$ мкм, что позволяет получить достаточно низкое сопротивление затвора в направлении длины секции - около 6 Ом при длине единичной секции затвора, равной 100 мкм. Аналогичная величина сопротивления Т-образного затвора составляют примерно 4 Ом при длине единичной секции затвора тоже равной 100 мкм, однако величины сопротивления Г-образного затвора равной 6 Ом достаточно для получения весьма высоких СВЧ характеристик (таблица 10).

Таблица 10. СВЧ параметры на частоте 10 ГГц и рабочие точки образцов полевого транзистора с составным Г-затвором 0,3×2400 мкм.

№	$P_{вх},$	$P_{вых},$	$K_y,$	$I_c,$	$I_3,$	$-U_3,$	$U_c,$	КПД, %
	мВт	мВт	дБ	мА	мкА	В	В	
1	200	1984	10,0	440	0,5	0,97	8	50,6
	50	630	11,0	260	0,1	0,97	8	
PIR-24 DpHEMT $f=10\text{ГГц}$								
2	380	2400	8,0	470	1,1	1,05	9	47,7
	300	2200	8,7	450	1	1,07	9	47
	250	2002	9,0	420	0,7	1,1	9	46,3
	200	1850	9,7	350	0,2	1,1	9	
	100	1100	10,4	290	0,2	1,1	9	
	50	550	10,4	240	0,1	1,1	9	
3	300	2400	9,0	470	0,5	0,95	9	49,6
	250	2280	9,6	450	0,5	0,95		50
	200	2000	10,0	420	0,5	0,95		
	100	1120	10,5	350	0,2	0,97		
	50	570	10,6	310	0,7	0,95		
4	300	2200	8,7	440	0,5	1,12	9	
	200	1900	9,8	400	0,5	1,12	9	48
	100	1100	10,4	390	1	1,1	9	47
	50	560	10,5	430	2	1,05	9	

Из приведенных в таблице 10 данных видно, что даже первые образцы транзисторов демонстрируют достаточно высокие КПД, удельную мощность и коэффициент усиления.

Таким образом, на практике получены доказательства возможности использовать способ наклонного и нормального напыления металлизации для изготовления затворов транзисторов с барьером Шоттки при длине основания

затворов до 0,3 мкм и менее (до 0,1 мкм) в серийном производстве МИС и транзисторов с помощью только оптической литографии – без использования электронно-лучевой литографии.

На примере МИС аттенюаторов и фазовращателей показано, что в сравнении с обычным методом использование Г-образного затвора позволяет существенно увеличить выход годных приборов.

Дальнейшее развитие предложенного способа формирования затвора может идти по пути оптимизации формы и размеров поперечного сечения затвора и размеров длин одиночных секций затвора для различных диапазонов рабочих частот транзистора. Перспективным является использование особенностей плазмохимического травления с управляемой энергией ионов и диэлектрических, и полупроводниковых слоев, что позволяет отказаться от использования химического травления подзатворного углубления и стоп-слоя в эпитаксиальной структуре.

1.3.4. Конструктивно-технологические преимущества Г-образного затвора транзисторов в сравнении с Т-образным затвором

Выявление характерных особенностей затворов в Г-образном и Т-образном исполнениях проведем исходя из сравнения следующих основных характеристик:

1. Величина максимально достижимого тока стока на единицу ширины затвора (А/мм) при подаче положительного потенциала на затвор.
2. Величины напряжений пробоя затвор-исток и затвор-сток.
3. Возможность увеличения рабочей частоты транзистора.

На рисунке 1-37 представлены сечения сравниваемых транзисторов.

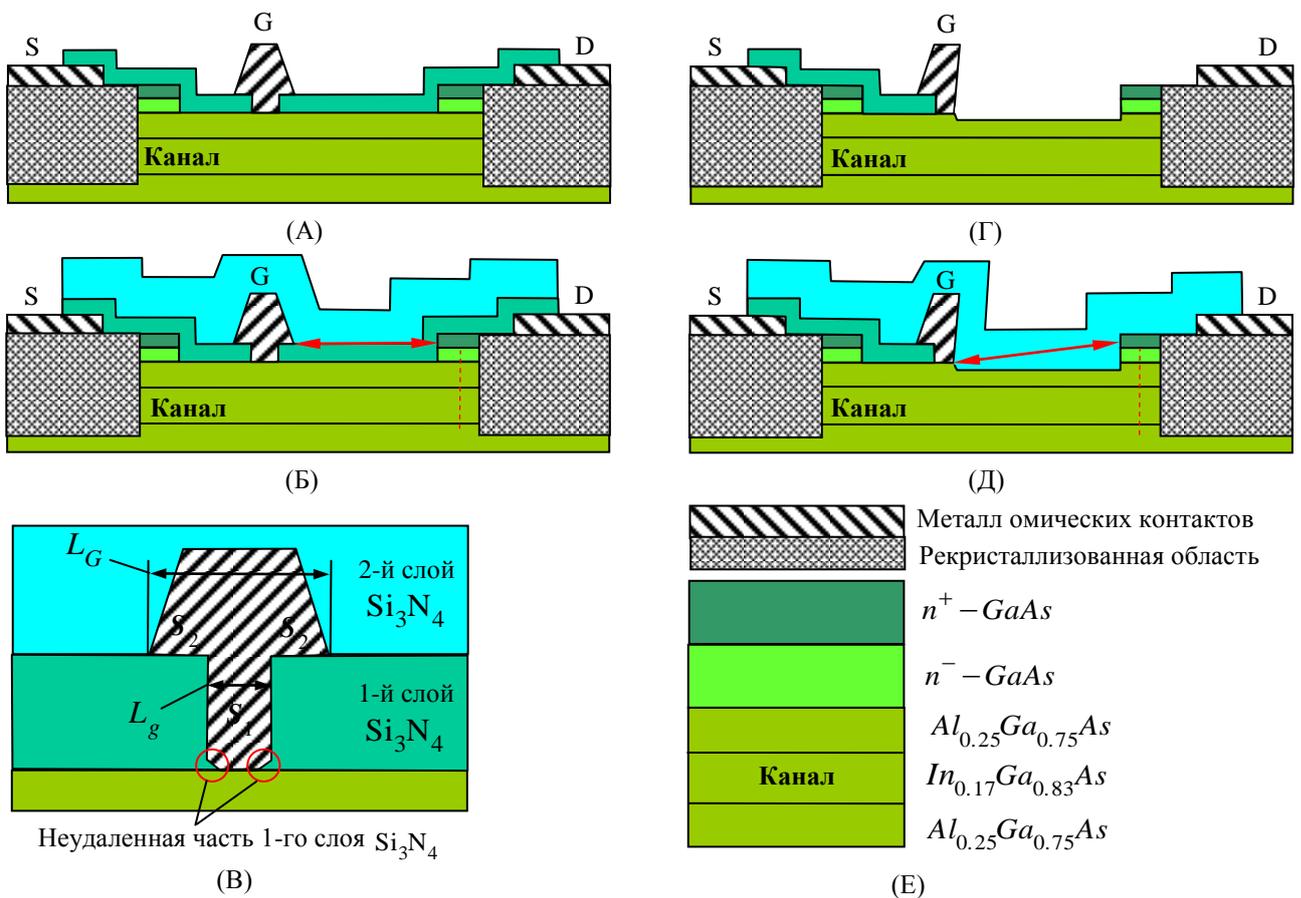


Рис. 1-37. Поперечные сечения транзистора с Т-образным затвором (А, Б) и с Г-образным затвором (Г, Д). (В, Г) – обозначения слоев транзистора.

На рисунке 1-37 приведены поперечные сечения типичных вариантов изготовления современных рНЕМТ транзисторов, различающихся типом

конструкции затвора. Характерные соотношения размеров Т-затвора следующие: длина основания - 0,1 мкм, высота ножки затвора равна толщине первого слоя Si_3N_4 - 0,1 мкм, величина напуска металлизации шляпки на первый слой Si_3N_4 в направлении истока и стока – по 0,1 мкм, высота шляпки – 0,3÷0,4 мкм.

Рисунок 1-37(В) показывает основные конструктивно-технологические недостатки Т-затвора в сравнении с Г-затвором. Управление проводимостью канала происходит не только под основанием затвора (имеющим площадь S_1), но и под областями напуска металлизации затвора на первый слой Si_3N_4 (имеющими площадь $2S_2$). Поэтому введение в конструкцию Т-затвора шляпки приводит к увеличению эффективно работающей длины затвора $L_{эф.}$, на которой наиболее сильно происходит управление проводимостью канала. Эта эффективная длина превышает величину L_g и имеет промежуточное значение, определяемое неравенством $L_g \leq L_{эф.} \leq L_G$. Дополнительное управление вне основания затвора частично ослабляется соотношением величин относительной диэлектрической проницаемости ε_2 первого слоя Si_3N_4 и ε_1 - верхнего слоя $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$, что приводит к ослаблению уменьшения величины I_{Dmax} - максимально достижимого тока стока на участке насыщения выходных ВАХ за счет паразитного управления под напуском металлизации. Последнее замечание становится очевидным, если воспользоваться следующей простой оценкой для величины добавки к поверхностной концентрации электронов в канале Δn_s , вызванной изменением потенциала затвора $\Delta \varphi_g$. Оценка проводится в простейшем приближении через выражение для емкости.

Под основанием затвора (смотри рисунок 1-37 (В)):

$$(\Delta n_s)_1 = C_1 \frac{1}{qS_1} \cdot \Delta \varphi_g = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0}{qd_1} \cdot \Delta \varphi_g, \quad d_1 - \text{толщина слоя } Al_{0.25}Ga_{0.75}As.$$

Под областями напуска металлизации затвора на первый слой Si_3N_4 :

$$(\Delta n_s)_2 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{1}{q \cdot 2S_2} \cdot \Delta \varphi_g \approx C_2 \cdot \frac{1}{q \cdot 2S_2} \cdot \Delta \varphi_g = \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_0}{q d_2} \cdot \Delta \varphi_g, \quad d_2 - \text{толщина первого}$$

слоя Si_3N_4 .

Последнее приближенное равенство в предыдущей оценке имеет место при условии $d_2 \gg d_1$, что обычно выполняется на практике.

Стремление уменьшить эффективную длину затвора путем увеличения толщины первого слоя Si_3N_4 при сохранении неизменной величины L_g приводит к технологическим трудностям при вскрытии окна в этом слое. Действительно, вскрытие узкого окна в толстом первом слое Si_3N_4 методом прецизионной плазмо - химической обработки (ПХО), проводимое с уменьшением энергии ионов при приближении к стадии окончания процесса, приводит к сохранению по углам окна неудаленных остатков слоя Si_3N_4 рисунок 1-37(В). Остатки слоя Si_3N_4 приводят к неровностям краев основания затвора, большая высота ножки затвора при сохранении величины напуска металлизации ослабляет увеличение пробивных напряжений, связанное со шляпкой затвора (ослабляется эффект «полевой обкладки») что отрицательно сказывается на пробивных напряжениях и шумовых характеристиках. Подбор таких режимов осаждения первого слоя Si_3N_4 , при которых по углам окна в этом слое после ПХО не остается остатков Si_3N_4 не приводит к полному успеху – такие слои Si_3N_4 с пониженной плазмо - химической стойкостью, как правило, отличаются пониженной напряженностью поля собственного пробоя. Кроме этого, сам факт управления проводимостью канала не только под основанием, но и под шляпкой затвора говорит о том, что Т-затвор представляет собой параллельное соединение контакта Шоттки с МДП контактом. Хорошо известно, что в МДП структурах появляется ряд проблем, связанных с ловушками в слое диэлектрика под затвором. Это, например, захват горячих электронов, сдвиг порогового напряжения вследствие захвата заряда, снижение радиационной стойкости вследствие ввода дополнительных ловушек в слой диэлектрика и т.д. По этой причине минимизация отрицательного влияния

МДП составляющей Т-затвора на работу транзистора полезна как в идейном, так и в практическом плане. Г-затвор представляет собой именно такое решение.

При одинаковых площадях сечения затвора, в Г-затворе можно получить меньшую длину основания. По части ослабления МДП эффекта в Г-затворе напуск металлизации затвора на первый слой Si_3N_4 в направлении стока отсутствует (рисунок 1-37(Г, Д)), что практически в два раза уменьшает площадь МДП составляющей затвора по сравнению с Т-затвором.

Очень важно, что формирование Г-затвора принципиально не требует формирования узких окон в толстых слоях диэлектрика рисунок 1-37(Г). По сравнению с Т-затвором, для формирования Г-затвора можно использовать ступеньку из существенно более толстого первого слоя Si_3N_4 (что дает дополнительное увеличение I_{Dmax}). На нижнем краю даже толстой ступеньки в первом слое Si_3N_4 методом ПХО существенно проще полностью удалить остатки Si_3N_4 вблизи поверхности верхнего слоя $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$ (причем без введения дефектов в этот слой!) и обеспечить ровность истокового края основания затвора. Формирование в Г-затворе напуска металлизации на первый слой Si_3N_4 только в направлении истока позволяет использовать полезный эффект полевой обкладки – подавляется эффект увеличения плотности тока затвора вблизи истокового угла у основания Г-затвора при большом положительном потенциале на затворе, сохраняется весь рабочий диапазон изменения потенциала затвора.

Относительное (по отношению к Т – затвору) увеличение продольного сопротивления одиночной секции Г – затвора, связанное с отсутствием стоковой части шляпки, может быть легко устранено за счет увеличения высоты ножки Г – затвора, смотри рисунок 1-37 (Г, Д). Это увеличение оказывается возможным благодаря возможности увеличения толщины первого слоя Si_3N_4 без появления серьезных сопутствующих проблем.

На рисунке 1-37(Б, Д) красными стрелками показано направление развития лавинного пробоя при подаче на затвор полностью запирающего канал отрицательного потенциала и достаточно большого положительного потенциала

на сток транзистора. При этом почти весь слой канала в области затвор – сток (вплоть до вертикальных красных штриховых линий) оказывается полностью обедненным электронами. Столь сильное обеднение происходит как из-за ухода электронов в исток, так и из-за эффекта экранирования большого положительного потенциала стока. Хорошо видно, рисунок 1-37(Б) что при Т-образном затворе обеспечиваются большие величины пробивного напряжения затвор – сток, но пробой может развиваться по границе раздела между первым и вторым слоями Si_3N_4 . Из-за меньшей электрической прочности первого слоя Si_3N_4 может наблюдаться даже некоторое снижение пробивного напряжения при Т-затворе по отношению к Г-затвору. При Г-образном затворе пробой развивается по толщине второго слоя Si_3N_4 (рисунок 1-37(Д)). Подбором режима формирования второго слоя Si_3N_4 за счет повышения его электрической прочности можно обеспечить достаточно большую величину пробивного напряжения затвор – сток. Тупой, а не острый, угол у стокового края основания Г-затвора также способствует увеличению этого пробивного напряжения. Исходя из направления развития лавинного пробоя, видно, что величина углубления, сформированного между стоковым краем основания Г-затвора и контактными слоями $n^- - GaAs$, $n^+ - GaAs$ (рисунок 1-37(Г)) в верхнем слое $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$ может быть весьма малой. Даже при весьма малой величине этого углубления (которое формируется при удалении собственного окисла с поверхности $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$) равной $30 \div 50 \text{ \AA}$, пробивное напряжение затвор-сток после нанесения второго слоя Si_3N_4 на практике получается равным 18 В.

Это пробивное напряжение затвор-сток, равное 18 В, достигается при расстоянии между стоковым краем основания Г-затвора и краем стокового слоя $n^+ - GaAs$, равном $0,7 \div 0,9 \text{ мкм}$, что является уровнем лучших мировых изделий для транзисторов этого класса. В дополнение отметим, что это пробивное напряжение затвор-сток может быть получено только при достаточно большой толщине слоя $n^- - GaAs$, примерно равной 300 \AA .

Увеличение максимальной частоты рабочего диапазона при замене Т-образного затвора в транзисторе на Г-образный затвор достаточно очевидно – оно является следствием уменьшения эффективной длины затвора L_G и уменьшения емкости затвор-сток.

1.5. НАДЕЖНОСТЬ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ.

Для определения надежности разработанных полевых транзисторов использовался «Расчетно-экспериментальный метод оценки показателей безотказности полевых транзисторов» вошедший в стандарт предприятия [99]. 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 [100,101].

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 ($\lambda = \lambda$). Испытания всех транзисторов, наработки которых при испытаниях составляют массив данных для расчетов. Для расчетов использованы соотношения РД 50-690 (раздел 2 приложения 5, таблицы 46,47) [100].

Транзисторы разделены на два вида:

- многозатворные транзисторы со штыревой структурой электродов "исток-затвор-сток" с периодом структуры меньше толщины кристалла (транзисторы средней мощности и мощные);

- транзисторы с нитевидным (в т.ч. секционированным) затвором (малой мощности и маломощные).

Испытанные транзисторы объединены в группы конструктивно-технологических аналогов по следующим показателям:

- транзисторы принадлежат к одному из вышеуказанных видов;

- транзисторы изготовлены по типовой технологии на однотипном оборудовании в одном подразделении;

- транзисторы имеют однотипную структуру активной области (канала, омических контактов, затвора);

- транзисторы имеют сопоставимые значения характеристических электрических параметров - погонного тока стока - $J_{c.n} = I_c/W$ (А/мм) и поверхностной плотности рассеиваемой мощности - $P_{расс}/S_{стр}$ (Вт/кв.см).

Принимаются следующие обозначения: I_c - ток стока, W - полная ширина затвора, $P_{расс}$ - рассеиваемая мощность, $S_{стр}$ - площадь поверхности структуры, равная $L_c \cdot N$ (N - число затворов, L_c - расстояние между затворами (период структуры)). Пример сопоставимости мощных (более 0,5 Вт) полевых транзисторов по совокупности конструктивных параметров представлен в таблице 11.

Таблица 11. Конструктивные параметры транзисторов-кристаллов (признаки сопоставимости).

Параметры	ТРАНЗИСТОР				
	КУРС-Т	ПИРАТ-40	ПИРАТ-48	ПЛАФОН-Г	ПРИНЦ
$N_э$, ед	30	32	36	36	192
$L_{стр}$, мкм	24	44	41	35	14
$L_{и-с}$, мкм	4	4	3,6	3,0	4,8
$L_э$, мкм	0,5	0,5	0,55	0,5	0,25
$W_э$, мкм	0,12	0,12	0,132	0,067	0,07
$H_{кр}$, мкм	100	100	100	100	40*
$R_{т.к}$, °С/Вт	22-19	16-13	14,5-12	23-20	3,8-3
$I_{с.макс}$, А	0,35	0,75	0,76	0,45	2,8
$I_{с.тип}$, А	0,3	0,49-0,52	0,61-0,65	0,40-0,43	2,2-2,4
$I_{с.пог.}$:					
-макс, А/мм	0,097	0,195	160	0,186	0,208
-тип, А/мм	0,0834	0,135	0,133	0,179	0,171
$U_{с.макс}$, В	9	8,5	8,5	8,5	9
$P_{расс}$, макс, Вт	2,5	5,5	7,5	4,2	15
тип, Вт	2,25	2,3-2,5	2,8-3,3	2,3-2,6	12,5-14
Плотность $P_{расс}$, макс Вт/см ²	$2,9 \cdot 10^3$	$3,58 \cdot 10^3$	$3,85 \cdot 10^3$	$4,95 \cdot 10^3$	$7,97 \cdot 10^3$

При формировании групп конструктивно-технологических аналогов для оценки безотказности разрабатываемого транзистора следует руководствоваться следующими критериями:

1). Температура канала транзистора-аналога в испытательном режиме не должна отличаться от температуры канала оцениваемого транзистора в заданном (типовом при эксплуатации - для конкретного типа или базовом - для группы транзисторов) режиме более, чем на 40 °С.

2). Для указанных выше параметров-признаков сопоставимости транзисторов следует выполнять условия:

$$- 3 \geq \{J_n (\text{аналога}) / J_n (\text{оцениваемого трз})\} \geq 1;$$

$$5 \geq \{P_p (\text{аналога}) / P_p (\text{оцениваемого трз})\} \geq 1;$$

$$10 \geq \{Q (\text{оцениваемого трз}) / Q (\text{аналога})\} \geq 1;$$

$$5 \geq \{t_{\text{имп}} (\text{аналога}) / t_{\text{имп}} (\text{оцениваемого трз})\} \geq 1.$$

Q - скважность, тмп - длительность импульса (для импульсного режима)

Значения наработок транзисторов (отказавших и сохранивших работоспособность к концу испытаний) различных типов ГКТА, испытанных в различающихся электрических режимах (по температуре канала $T_{к.и}$, погонному току $J_{с.п}$) пересчитывают к фиксированному базовому режиму ($T_{к.б}$, $J_{п.б}$) по формуле:

$$t_{н.б} = t_{\text{исп}} \cdot K_{п.и.б} \quad (1-4)$$

где: $t_{н.б}$ - значение наработки в базовом режиме;

$t_{\text{исп}}$ - значение наработки в испытательном режиме.

$K_{п.и.б}$ - коэффициент пересчета наработок транзисторов ГКТА к единому (базовому) режиму.

Для расчета $K_{п.и.б}$ использовано модифицированное соотношение Аррениуса [102], в соответствии с которым коэффициент пересчета:

$$K_{п.и.б} = \left(\frac{J_{н.и}}{J_{п.б}} \right)^n \cdot \exp \left(- \left(\frac{E_a}{K_b} \right) \left(\frac{1}{T_{к.и}} - \frac{1}{T_{к.б}} \right) \right) \quad (1-5)$$

В выражении (1-5) введены следующие обозначения:

E_a - параметр ускорения, характеризующий скорость изменения контролируемого параметра изделия при изменении его температуры ("энергия активации"), эВ;

n - параметр, характеризующий скорость изменения контролируемого параметра изделия при изменении тока стока;

K_b - постоянная Больцмана;

$J_{п.б}$ - значение погонного тока стока транзистора в базовом режиме, А/мм;

$J_{п.и}$ - значение погонного тока стока испытанного транзистора, А/мм;

$T_{к.б}$ - температура канала транзистора в базовом режиме, °К;

$T_{к.и}$ - температура канала испытанного транзистора в испытательном режиме, °К.

По результатам пересчета образуют массив исходных данных для определения значений групповых показателей надежности ГКТА в базовом режиме:

$$\begin{aligned} N_u &= \sum N_i; \\ r &= \sum r_i; \\ t_{сум} &= \sum_r t_{i,r} + \sum t_{i,a} \end{aligned} \quad (1-6)$$

В выражении (1-6): N_u - суммарное количество испытанных транзисторов 1ГКТА;

N_i - количество испытанных транзисторов i -го типа;

$t_{сум}, (S)$ - суммарная наработка (для базового режима);

$t_{i,r}$ - индивидуальная наработка каждого отказавшего транзистора в выборке i -го типа ГКТА;

$t_{i,a}$ - наработка работоспособных транзисторов в выборке i -го типа ГКТА;

$N_d, (d, r)$ - суммарное число отказов в выборках ГКТА.

При наличии отказов ($N_d > 4$ -х в группе) групповое значение ПБО рассчитывают для экспоненциального распределения наработок по формулам

таблиц 39, 46, 47 РД 50-690 [101] при типовых значениях допустимой ошибки и доверительной вероятности (6.2.1.3 РДП [101]).

При отсутствии отказов - определяют верхнюю доверительную границу λ_q (или нижнюю доверительную границу T_{γ}) по формуле (табл.46,47) [101]:

$$\lambda_q \leq \frac{r_0}{T_{CVM}} \quad (1-7)$$

В выражении (1-7): $r_0 = -\ln(1-q)$, q - доверительная вероятность.

При $q = 0,5$, $r_0 = 0,693$; при $q = 0,6$, $r_0 = 0,92$; при $q = 0,8$, $r_0 = 1,6$.

Если на этапе разработки ТЗ на ОКР, при недостаточном объеме информации, выполнимость исходного требования заказчика может быть оценена с доверительной вероятностью менее 0,5, то используются экспертные оценки и либо устанавливаются в ТЗ приемлемые значения ПБО, либо планируются испытания в ПОК (ПОН) в достаточном объеме.

1.5.1. Определение значений характеристических параметров транзисторов

Величина E_a (это энергия активации процессов деградации свойств полупроводниковой структуры и/или параметров приборов) с учетом рекомендаций [103,105] и результатов исследований, выполненных на предприятии, принята равной 0,8 эВ.

Значение параметра n на основе данных [103] 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, аппаратурного и программного (аналитического) обеспечения для определения температуры канала может быть использован экспериментальный или расчетный методы.

Наиболее распространенными являются метод ИК-термометрии [102] и метод термочувствительного параметра (ТЧП) [105].

Эти два метода позволяют определить интегральное (усредненное по конечной области полупроводниковой структуры транзистора) значение температуры канала.

Метод ИК-термометрии, реализованный в ИК-микробиометре 14КИ1 (разработка ОАО РНИИ «Электронстандарт»), применим для измерения температуры канала многозатворных транзисторов, период структуры которых L_s и ширина единичного затвора W_1 сопоставимы с диаметром "видимой" микробиометром области (D_n порядка 40 мкм) инфракрасного излучения поверхности наблюдаемого объекта. Это условие выполняется практически для всех многозатворных транзисторов (транзисторов с выходной мощностью не менее 0,1 Вт).

Для таких структур ($L_s (W_1) > D_n$) ИК - микробиометр позволяет выявлять макронеоднородности температурного поля полупроводниковой структуры.

Метод ТЧП применим практически для всех транзисторов, но предпочтительнее для однозатворных малошумящих транзисторов, а также для транзисторов с малым числом затворов (≤ 10), для которых априорно можно считать распределение температуры по активной области близким к однородному.

Для расчетов могут быть использованы аналитические методы, описанные в [106-108], методы, рекомендуемые в ОСТ 11 0944 [109], а также численные методы, имеющиеся в распоряжении исполнителей ОКР. Метод [106] ориентирован на расчет температуры канала одно - и многозатворных структур транзисторов, сформированных на кристаллах конечной толщины, но с неограниченными поперечными размерами. Учитывается зависимость теплопроводности кристалла от температуры. Неоднородность структуры по ширине канала (вдоль затворного пальца) не учитывается, но учтено влияние периодичности структуры на условия распространения тепла к теплоотводящей поверхности (основанию) кристалла. Этот метод дает, по-видимому, несколько

завышенное значение температуры, поскольку отвод тепла по кристаллу в поперечном направлении (вдоль затворного пальца) не учитывается.

В [107] предпринята попытка эмпирическим путем учесть влияние краевых эффектов при расчете теплового сопротивления многозатворных транзисторов на основе той же модели, что и в [106]. Расчетные и экспериментальные значения [107] ниже значений, рассчитанных по [106] для тех же структур (в [107] измерения выполнены методом ТЧП).

В [108] приводится решение задачи о трехмерном распределении температуры в параллелепипеде конечных размеров, на одной из поверхностей которого расположен источник тепловыделения в виде прямоугольника с поверхностной плотностью теплового потока Q . Размеры прямоугольника не совпадают с размерами грани параллелепипеда, на которой расположен источник. Задача решается при граничном условии теплоизолированных боковых поверхностей теплоотвода (кристалла): тепло через боковые стенки параллелепипеда не переносится. Задача решена в предположении независимости коэффициента теплопроводности K_t от температуры и принято, что K_t равен коэффициенту теплопроводности GaAs при температуре основания кристалла.

Для определения температуры канала $T_{\text{кан}}$ транзисторов (испытанных и анализируемого) используется следующее уравнение равновесного состояния для полупроводниковой структуры:

$$T_{\text{кан}} = T_{\text{осн}} + \Delta T_{\text{кан}}(T_{\text{осн}}, P_{\text{расс}}) \quad (1-8)$$

$$\text{Где } T_{\text{осн}} = T_{\text{корп}} + (R_{\text{т.к}} + R_{\text{т.осн}}) \cdot P_{\text{расс}} \quad (1-9)$$

В выражениях (1-8) и (1-9) использованы следующие обозначения:

$R_{\text{т.к}}$ - тепловое сопротивление стенки корпуса;

$R_{\text{т.осн}}$ - тепловое сопротивление основания (кристаллодержателя) транзистора;

$T_{\text{корп}} = T_{\text{о.с}} + \Delta T_{\text{корп}}$ ($T_{\text{о.с}}$ - температура окружающей среды, $\Delta T_{\text{корп}}$ - перегрев корпуса относительно окружающей среды).

Температуру корпуса определяют экспериментально или считают априорно известной (заданной).

Тепловое сопротивление стенки корпуса и кристаллодержателя (из материалов с высокой теплопроводностью) от температуры зависит слабо, поэтому может быть рассчитано по [108] в приближении $K_T = \text{const}$ (последовательно при температуре внешней и внутренней поверхностей корпуса соответственно).

Перегрев канала $\Delta T_{\text{кан}}$ относительно основания кристалла-теплоотвода (из материала, теплопроводность которого зависит от температуры) может быть рассчитан по модифицированному методу [108].

При этом надо отметить, что решение, полученное в [108] непосредственно применимо к однозатворным транзисторам на кристалле:

- размеры теплоотвода ограничены размерами кристалла;
- определение размеров области тепловыделения представляет универсальную задачу для любого метода [110-113], чаще всего область тепловыделения представляют в виде прямоугольника с размерами $W \times L_T$ (W - ширина затвора, L , - размер вдоль канала порядка 0.5 мкм) [110,111,113].

Для МИС определение параметров теплоотвода для транзистора несколько усложняется, если на плате есть другие источники тепловыделения. В этом случае можно размеры области теплоотвода устанавливать условно в 5 - 10 раз превышающими размеры области тепловыделения.

1.5.2. 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 ПБО - (по форме таблицы 11).

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 по [106]. После этого рассчитывают значения $\lambda_{т.э}$ для транзистора ТрКт в рабочем режиме для указанных значений $T_{корп}$ ($T_{о.с}$) по формуле:

$$\lambda_{т.р} = \lambda_{т.б} \cdot K_{п.б.р} \quad (1-10)$$

$$K_{п.б.р.} = \left(1 + \frac{\Delta J_{п.б.}}{J_{п.б.}} \right)^n \exp \left(\frac{-(E_a/K_b) \cdot F(z)}{T_{п.б.}} \right)$$

В выражениях (1-10) приняты следующие обозначения:

$$\Delta J_{п.б.} = J_{п.р} - J_{п.б.};$$

$$F(z) = -|z| \cdot (1 + |z| - |z|^2) \quad - \text{при } z > 0; \quad F(z) = |z| \cdot (1 + |z| + |z|^2) \quad - \text{при } z < 0 \quad (1-11)$$

$$z = \frac{T_{к.р} - T_{к.б.}}{T_{к.б.}}, \quad - \text{при условии } |z| < 0,1.$$

Рассчитанные значения $\lambda_{т.э}$ используют при расчете ПВО РЭИ взамен значений, определяемых для полевых транзисторов по Справочнику "Надежность ЭРИ" (22ЦНИИ МО).

1.5.3. Результаты анализа надежности

Целью анализа является оценка показателей надежности (безотказности) разработанных и выпускаемых предприятием в течение последнего десятилетия полевых транзисторов и создание справочных данных, которые могут быть использованы при расчете показателей надежности модулей на их основе и прогнозировании надежности вновь разрабатываемых транзисторов.

Показателями безотказности являются интенсивность отказов λ [1/ч] и гамма-процентная наработка до отказа при $\gamma = 95\%$.

Группу КТА составляют транзисторы "Курс-Т", "Пират-40", "Пират-48", "Плафон". Признаки сопоставимости по конструктивно-технологическим и электрическим параметрам (испытательным) приведены в таблице 12.

Исходными данными для анализа и оценки значений $\lambda_{т.э}$ и $T_{\gammaб}$ являются результаты испытаний при проведении ОКР и производственных испытаний указанных транзисторов по категориям П-1 и Дг в 1995-2005 г. Параметры испытательных режимов и значения наработок приведены в таблице 12.

Таблица 12. Испытательные и рабочие режимы и наработка транзисторов.

Вид испытаний Параметры	ТРАНЗИСТОРЫ (кристаллы)			
	КУРС-Т	ПИРАТ-40	ПИРАТ-47	ПЛАФОН-Г
Нормальные:				
$T_{осн}, ^\circ C$	85	100	100	70
$U_c, В$	7,5	7,5	7,5	7,5
$I_c, А$	0,3	0,36	0,45	0,4
$P_{расс}, Вт$	2,25	2,7	3,375	3
$R_{т}, ^\circ C/Вт$	23,6-25,2	17,7-18,9	16,2-17,7	28,8-31,7
$T_{кан.исп.}, ^\circ C$	138-142	148-151	155-160	156-162
$J_{с.пог.}, А/мм$	0,0834	0,0937	0,0947	0,166
Наработка, ч (суммарная)	90000 (1995-2005) г	45000 (1999-2004) г	10000 2005 г	10000 2005 г
Ускоренные:				
$T_{осн}, ^\circ C$		100	70	
$U_c, В$		7,5	8	
$I_c, А$		0,73	0,825	
$P_{расс}, Вт$		5,475	6,6	
$R_{т}, ^\circ C/Вт$		20-21	14-14,7	
$T_{кан.исп.}, ^\circ C$		209-217	190-198	
$J_{с.пог.}, А/мм$		0,19	0,1736	
Наработка, ч (суммарная)		7250	4000	

Так как 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 $T_{\gammaб}$) доверительные границы при заданном уровне q (≤ 0.5) по формулам таблицы 47 РД 50-690.

В этом случае имеют место следующие выражения:

$$\lambda_{т.б} \leq \lambda_{т.б.В} ; \lambda_{т.б.В}(q) = r_0(q)/t_{сум} ; r_0(q) = -\ln(1-q)$$

$$T_{\gammaб} \geq \frac{-(\ln(\gamma/100))}{\lambda_{т.б.В}} \quad (\gamma \text{ В } \%) \quad (1-12)$$

Результаты расчета промежуточных величин и конечный результат расчета базовых параметров для ГКТА по (А.3) приведены в таблице 13.

Таблица 13. Промежуточные величины и конечные базовые параметры.

Тип транзистора в ГКТА; Параметры	КУРС-Т	ПИРАТ-40		ПИРАТ-47		ПЛАФОН
	Норм. и .	Норм. и.	Форс. и.	Норм. и.	Форс. и.	Норм. и.
N, шт.		10	10	10	10	10
Пог. Ток, $J_{п.и}$, А/мм						
$T_{осн.и}$, °С	85	100	100	100	100	70
$T_{к.и}$, °С	140	150	210	160	195	155
$T_{исп}$, ч, Сум	90000	45000	7250	10000	4000	10000
$K_{п.и.б}$, ед	1,17	2,265	82,27	3,53	35,25	7,05
Отказы, ед	0	0	0	0	0	0
$t_{сум}$ Выборки	105,33	101,9	615,12	35,28	141	70,55
$t_{сум}$ Группы	1069,17 тыс.ч					
Отказы в группе, г, ед	0					
N группы, ед	140					

По формулам (1-10) получаем следующие величины:

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

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

Для $T_{т.р} = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $J_{т.р} = 0,1 \text{ А/мм}$ по (7) получим $K_{п.б.р} = 0,247$ и

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

$\lambda_{т.р} \leq 0,53 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$ ($T_{\gamma=95\%} \geq 96 \text{ тыс.ч}$) при доверительной вероятности $q=0,9$.

Следует отметить, что данные характеристики соответствуют мировому уровню показателей надежности для аналогичных полевых транзисторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 1.

В главе 1 приведены следующие основные результаты работы:

1. Разработана и представлена оригинальная конструкция мощного полевого транзистора, в которой использовано наклонное напыление металлизации секций затворов, обеспечивающее сдвиг оснований затворов в направлении истока. Представлена оригинальная методика формирования мощного полевого транзистора, которая за счет использования углового (наклонного) напыления металлизации позволяет не только сдвинуть секции затворов в канале к истоку, но и существенно уменьшить длину основания затвора в каждой секции без увеличения ее продольного сопротивления. Это решение обеспечивается формированием затвора с Г-образной формой поперечного сечения каждой одиночной секции. Приведены результаты оптимизации данной конструкции, как по ширине полуизолирующего слоя, так и по величине смещения затвора к истоку транзистора.

2. Показано, что в разработанной технологии изготовления СВЧ полевого транзистора при формировании электрода затвора напыление металлизации должно проводиться под углом, равным $102\text{--}112^{\circ}$ к верхней поверхности эпитаксиальной структуры относительно истока. Уменьшение угла напыления до величин менее 102° малоэффективно, а напыление под углом более 112° недопустимо, так как приводит к сильному сдвигу основания затвора в сторону истока и, как следствие, приводит к снижению пробивного напряжения затвор-исток и к потере работоспособности ПТШ.

3. Приведены характеристики транзисторов, изготовленных по разработанной технологии в условиях серийного производства, показано, что

данный способ изготовления позволяет повысить: выходную мощность примерно на 25 процентов, коэффициент усиления по мощности примерно на 2–2,5 дБ, коэффициент полезного действия примерно на 7–10 процентов, снизить коэффициент шума примерно 0,3–0,5 дБ.

4. Предложенный способ формирования затворов можно успешно применять для изготовления как мощных СВЧ полевых транзисторов с барьером Шоттки, так и для изготовления малошумящих транзисторов.

5. 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 выходных ВАХ от частоты и длительности переменного сигнала, что является причиной дрейфа параметров приборов во времени.

6. Экспериментально исследована фоточувствительность арсенид-галлиевых полевых транзисторов в сильных электрических полях. Установлено наличие трех областей с разным знаком фотопроводимости. Показано, что характер фотоотклика приборов определяется не столько природой глубоких центров вблизи $n-i$ -перехода, возбуждаемых световым воздействием, сколько процессами формирования области сильного поля и перераспределения напряжения между ней и остальной частью прибора.

7. Для предотвращения попадания горячих электронов из канала в буферный слой и миграции дефектов из области буферного слоя в активный слой, предложено на границе между активным и буферным слоем создать дополнительный резкий потенциальный барьер с помощью введения в структуру p – слоя. Представлены результаты демонстрирующие, что введение этого слоя может на несколько порядков уменьшать токи утечки полупроводниковых структур.

8. Продемонстрировано, что при наличии большого количества углерода на границе раздела металл–полупроводник в ПТШ могут наблюдаться как неустойчивости ВАХ во времени, так и утечки в низкотоковой области ВАХ барьеров. Показано, что при проведении химических обработок перед осаждением барьерного слоя наблюдается загрязнение поверхности GaAs углеродом в основном за счет разрушения фоторезиста, после чего ряд дополнительных операций по очистке поверхности был включен в технологические маршруты изготовления транзисторов и различных монолитных интегральных схем.

9. Рассмотрены свойства системы металлизации омических контактов истоков и стоков арсенидгаллиевых транзисторов с диффузионным барьером на основе гексаборида лантана LaB_6 , а также технология формирования таких контактов. Показано, что система металлизации $\text{Ni}/\text{AuGe}/\text{LaB}_6/\text{Au}$ обладает низким сопротивлением (удельное сопротивление $1 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$) и стабильностью при высоких температурах (300°C). Таким образом, для ПТШ разработан технологический процесс формирования омических контактов с диффузионным барьером на основе гексаборида лантана $\text{Ni}/\text{AuGe}/\text{LaB}_6/\text{Au}$, обеспечивающий низкое контактное сопротивление и высокую термостабильность.

10. Разработана оригинальная конструкция мощного полевого транзистора, позволяющая использовать наклонное напыление металлизации затвора для сдвига секций затворов к истоку транзистора.

Разработана оригинальная методика формирования мощного полевого транзистора, которая позволяет существенно уменьшить длину основания затвора транзистора (до величин менее 0,15 мкм при характерном разрешении фотолитографического оборудования 0,45 мкм) без увеличения его омического сопротивления и формировать затвор с Г – образной формой поперечного сечения каждой одиночной секции. Показано, что длина основания затвора транзистора при его формировании методом фотолитографии может быть получена равной примерно $0,09 \div 0,11$ мкм что намного меньше разрешения

использованного фотолитографического оборудования (около 0,45 мкм). При этом характерные размеры поперечного сечения шляпки затвора составляют примерно 0,5×0,5 мкм, что позволяет получать достаточно низкое омическое сопротивление затвора: около 6 Ом в каждой одиночной секции затвора, имеющей длину 100 мкм.

11. Представлены результаты оптимизации способа изготовления разработанного транзистора по конструктивно – технологическим параметрам.

12. Результаты работы использовались как для создания ряда серийных транзисторов (ЗП612 А,Б,В ЗП976 А,Б,В,Г,Д) на базе которых был создан ряд гибридных и монокристаллических схем с параметрами, не уступающими лучшим образцам мирового уровня [114-121] и результатам последних исследований [120-121].

ГЛАВА 2. ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ И ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С УСИЛЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ В КАНАЛЕ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в большинстве полупроводниковых приборов размеры активной области становятся сравнимыми с длинами релаксации электронов по импульсу и энергии. Длины релаксации из-за сложного распределения электрического поля в свою очередь могут сильно меняться по длине активной области. В последние годы в полевых транзисторах с барьером Шоттки с субмикронными и нанометровыми длинами затвора часто используют сложные рельефы поверхности и полупроводниковые структуры (заглубления под затвором транзистора разной формы, метод самосовмещения затвора, сложные профили легирования, гетероинжекторы и т.д.). Зачастую экспериментальные разработки становятся практически бессмысленными без предварительной оптимизации структур и конструкций транзисторов. При этом от программ моделирования приборов требуется не только качественное, но и достаточно точное количественное описание характеристик приборов, распределений в них электрических полей, скоростей, энергий и концентраций электронов. Широкое применение гетероструктур с их специфическими особенностями, усиление активности в развитии новых технологий и в разработке достаточно точных и быстродействующих программ расчета активных элементов, придают этой проблеме дополнительный интерес. Известно, что динамика электронов в транзисторах с характерными длинами затвора порядка десятых долей микрона, а соответственно и характеристики таких приборов наиболее точно рассчитываются методом Монте-Карло [122-126]. Однако из-за своей вычислительной сложности этот метод до сих пор малоприменим для оптимизационных расчетов. Наиболее вероятными кандидатами на роль основной расчетной модели пока остаются различные модификации гидродинамической модели (ГДМ), например, [127-128].

В последние годы наблюдается усиление активности в области разработки мощных полевых транзисторов на основе широкозонных материалов, особенно на GaN гетероструктурах, и их использования в различных типах усилителей мощности. Приборы показывают рекордные характеристики в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн [129-133]. Стремительное улучшение характеристик GaN транзисторов почти не оставляет сомнений в том, что традиционные мощные СВЧ pHEMT транзисторы на основе AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктур в ближайшее время будут практически полностью вытеснены из аппаратуры сантиметрового и длинноволновой части миллиметрового диапазонов длин волн. Исключение составляет разве что СВЧ аппаратура, требующая низковольтное (не более 8 – 9 В) напряжение питания или высокую линейность зависимости выходной СВЧ мощности от входной СВЧ мощности.

К несомненным достоинствам нитрида галлия относят большую величину запрещенной зоны, и как следствие высокие пробивные напряжения, высокую теплопроводность, достаточно высокую подвижность в слабых электрических полях и большие величины максимальной дрейфовой скорости в объемном материале, а также высокую дрейфовую скорость в сильных полях.

В последнее десятилетие ведутся активные разработки и производятся мощные полевые транзисторы на основе ряда широкозонных материалов, но особенно активно и успешно разрабатываются и производятся приборы на основе AlGaN-GaN и InAlGaN-GaN гетероструктур [134]. Для демонстрации прогресса в этой области достаточно отметить следующие наиболее важные новые технические решения, апробированные в технологии гетероструктур и транзисторов с GaN каналом: Введение в структуру слоев, содержащих In, что обеспечило получение дополнительного фактора, управляющего поляризационными эффектами. Следствием этого решения является возможность дополнительного управления механическими напряжениями, концентрацией электронов, плотностью дефектов и формой потенциального рельефа в структуре [135]. Формирование на поверхности структур защитно-стабилизирующего SiN-покрытия, проводимое методом эпитаксии из молекулярных пучков,

непосредственно в процессе роста структур – решение позволяет практически полностью подавить эффект коллапса тока стока [136,137]. Формирование омических контактов к промежуточным объемно-легированным донорами GaN-слоям, контактирующим с нелегируемым GaN каналом. Такое решение позволяет существенно уменьшить переходное сопротивление омических контактов истока, стока и сопротивление транзистора на омическом участке выходных вольт - амперных характеристик (ВАХ) [138]. К сожалению, это техническое решение не позволяет вырастить все слои структуры без извлечения структур из установки эпитаксиального наращивания – для локальной эпитаксии требуется проведение операций литографии и вскрытия поверхности слоя GaN канала.

Существенное улучшение характеристик GaN-транзисторов почти не оставляет сомнений в том, что в ближайшее время традиционные мощные СВЧ рНЕМТ (pseudomorphic high electron mobility transistor) транзисторы на основе псевдоморфных AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктур будут практически полностью вытеснены из сантиметрового и длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн. Исключением из этой тенденции пока остаются различные варианты транзисторов в исполнении рНЕМТ и mНЕМТ, с достаточно высокой линейностью зависимости выходной СВЧ мощности от входной СВЧ мощности, транзисторы коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн, транзисторы субмиллиметрового диапазона длин волн.

На основании данных о статической зависимости дрейфовой скорости от поля, а возможно из конъюнктурных соображений, делается вывод о перспективности использования нитрида галлия в миллиметровом диапазоне длин волн и даже об его определенных преимуществах перед арсенидом галлия по этому параметру. Последнее утверждение выглядит весьма спорным и поэтому представляет интерес рассмотреть его более подробно, используя результаты хотя бы качественных расчетов.

2.1. ОСОБЕННОСТИ НЕЛОКАЛЬНОГО РАЗОГРЕВА ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Как отмечалось выше, наиболее точно характеристики транзисторов с субмикронными и нанометровыми длинами затворов рассчитываются методом Монте-Карло. Из-за своей вычислительной сложности этот метод редко используется в двумерных или трехмерных моделях. Основные затраты времени идут на решение кинетического уравнения, а время его решения, естественно, зависит от размерности решаемой задачи, но для полевых транзисторов особую ценность представляют многомерные модели, поэтому одномерные модели на основе кинетического уравнения практически не развивались. Однако, в большинстве случаев наиболее наглядно вклад отдельных физических механизмов в транзисторах выявляется в одномерных моделях [139].

В частности, одна из простых моделей ПТШ, предназначенная для расчета статических характеристик транзисторов без учета диффузионных эффектов, основана на системе уравнений [140-142]:

$$\begin{aligned} I &= qWhvn \\ \frac{\partial(E_x h)}{\partial x} &= \frac{q}{\kappa\kappa_0} (n - N_D) h \\ v_x \frac{\partial m^* v_x}{\partial x} &= qE_x - \frac{m^* v_x}{\tau_p(\varepsilon)} \\ v_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} &= qE_x v_x - \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\tau_\varepsilon(\varepsilon)}, \end{aligned} \tag{2-1}$$

Где: W – ширина затвора;

h – высота канала;

N_D – концентрация доноров;

m^* – эффективная масса электронов;

q – заряд электронов;

n – концентрация электронов;

ε – энергия электронов;

ε_0 – энергия электронов при температуре решетки;

I – ток, текущий через транзистор;

$E_x(\varepsilon)$ – статические значения напряженности электрического поля;

$v_x(\varepsilon)$ – статические значения дрейфовой скорости электронов, соответствующие энергии « ε ».

$E_x(\varepsilon)$ и $v_x(\varepsilon)$ обычно определяются из расчетов методом Монте-Карло [143].

Подставляем в уравнения (2-1) времена релаксации [140]:

$$\tau_p(\varepsilon) = \frac{m^*(\varepsilon)v_s(\varepsilon)}{qE_s(\varepsilon)}, \quad \tau_\varepsilon(\varepsilon) = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{qE_s(\varepsilon)v_s(\varepsilon)} \quad (2-2)$$

В результате получаем следующие выражения:

$$I = qWh\nu n, \quad \frac{\partial(E_x h)}{\partial x} = \frac{q}{\kappa\kappa_0}(n - N_D)h$$

$$v_x \frac{\partial m^* v_x}{\partial x} = q \left(E_x - E_s \frac{v_x}{v_s} \right), \quad v_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = q(E_x v_x - E_s v_s) \quad (2-3)$$

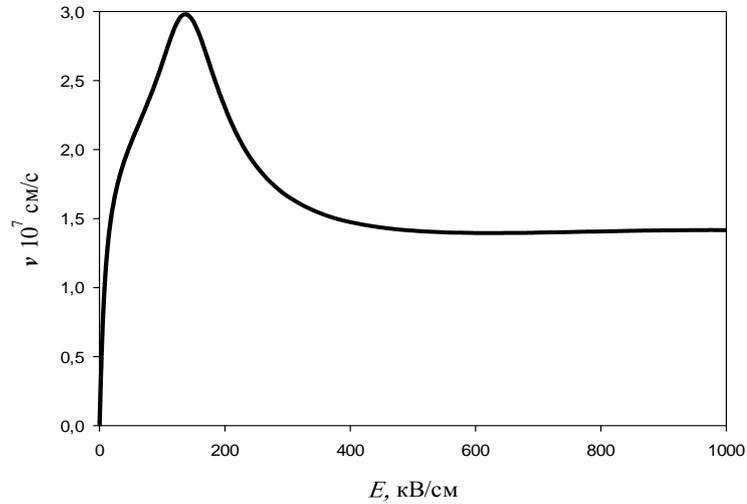
Уравнения температурной модели выводятся из системы (2-1) с учетом уравнений (2-2), в которых полагается выполнение условия $\tau_p(\varepsilon) \rightarrow 0$. При этом второе уравнение в (2-3) дает следующее выражение для дрейфовой скорости:

$$v = \frac{E \cdot v_s(\varepsilon)}{E_s(\varepsilon)} = \mu(\varepsilon)E \quad (2-4)$$

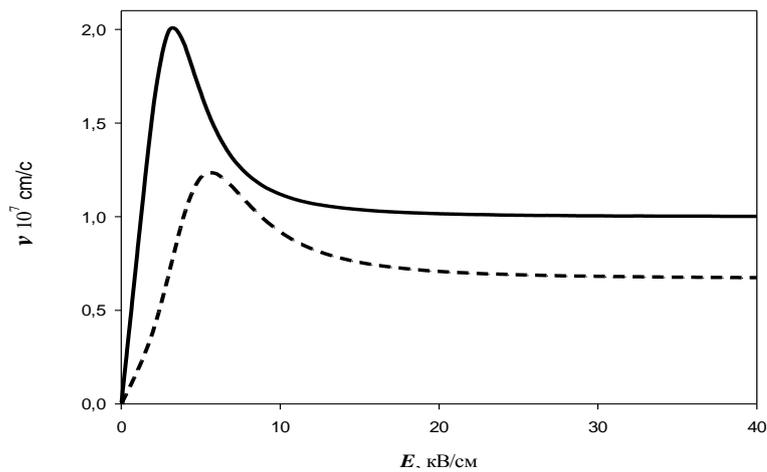
где $\mu(\varepsilon)$ – подвижность электронов, зависящая от их энергии, v – скорость электронов.

Отличительными особенностями нитрида галлия являются высокая дрейфовая скорость электронов в сильных полях и не слишком высокая подвижность в слабых полях (далее в расчетах полагается $\mu = 1700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$). Так как исследуются особенности электронного транспорта, то для сравнения берется арсенид галлия с той же величиной подвижности (она соответствует уровню

легирования в арсениде галлия примерно $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Соответствующие графики приведены на рисунке 2-1. Там же приведен график статической дрейфовой скорости, соответствующий нелегированному GaAs ($\mu = 8000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$).



(а)



(б)

Рис. 2-1. (а): зависимость статической дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля в GaN, (б): зависимость статической дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля в GaAs при $\mu = 8000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ (—) и при $\mu = 1700 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ (- - -).

Арсенид галлия, особенно при искусственном задании такой же низкой подвижности, как в GaN, по величине максимума дрейфовой скорости на полевой зависимости безоговорочно проигрывает нитриду галлия, но более корректным является сравнение дрейфовых скоростей при одинаковых напряженностях

электрического поля. Из рисунка 2-1 (а) видно, что максимум дрейфовой скорости в GaN достигается при больших напряженностях электрического поля, близких к началу развития лавинного пробоя в GaAs. Понятно, что средняя статическая скорость электронов под затвором GaN транзистора, существенно зависящая как от величины ее максимума на полевой зависимости, так и от их скорости в предельно сильных полях, будет выше, чем под затвором GaAs транзистора. При разработке первых транзисторов с субмикронной длиной затвора стало известно, что работа таких приборов определяется не статической зависимостью дрейфовой скорости от напряженности электрического поля, а всплеском дрейфовой скорости электронов под затвором транзистора [127,144,145]. Всплеск дрейфовой скорости, в свою очередь, зависит от множества факторов, в которых статическая зависимость скорости от поля является важным, но далеко не определяющим. При всплеске дрейфовой скорости ее величина может существенно превышать максимальное статическое значение в объемном материале, что существенно увеличивает быстродействие транзистора. В принципе, всплеск дрейфовой скорости можно наблюдать практически в любых полупроводниковых материалах, и в GaN он может быть весьма велик – максимальная скорость может достигать величин около $8 \cdot 10^7$ см/с на расстояниях около 0.025 мкм [146], однако в условиях настолько специфических, что они практически не реализуемы в обычных транзисторах.

Для сравнения эффектов, связанных с этим всплеском в GaN и GaAs транзисторах, при моделировании GaN транзистора использовалась простейшая структура толщиной 18 нм, состоящая из двух слоев. Первый слой - под затвором толщиной 15 нм с уровнем легирования донорами 10^{18} см⁻³. Вторым слоем - толщиной 3 нм у гетерограницы с уровнем легирования донорами $2 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Для GaN транзистора такая структура – очень грубая модель простейшей структуры с подвижностью электронов примерно 1700 см²/(В·с) (эта величина, близкая к величине подвижности электронов в слое нелегированного GaN). Для арсенида галлия такая структура вообще гипотетическая и берется исключительно, чтобы сравнить особенности электронного транспорта в практически одинаковых

условиях. Расчеты также проводились и для GaAs при задании $\mu = 8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, что соответствует нелегированному материалу или очень хорошей гетероструктуре с оптимальной толщиной спейсера. Положение затвора транзистора длиной 0.1 мкм выбиралось на расстоянии 0.1 мкм от истока. Единственная существенная разница в исходных данных для расчетов – разное напряжение на стоке транзисторов (1 В для GaAs, 3 В для GaN). Это примерно те напряжения на стоке, при которых происходит насыщение тока стока в выходных ВАХ и когда максимальная частота усиления по току принимает наибольшее значение. Надо отметить, что при расчетах по данной модели двукратное увеличение потенциала на стоке в GaN и в GaAs транзисторах слабо меняло распределение дрейфовой скорости по длине канала и величину максимальной частоты усиления по току. Сильно менялась только распределение величины напряженности электрического поля по длине канала.

Результаты расчета максимальной частоты усиления по току f_t от длины затвора L_3 для транзисторов на таких структурах приведены на рисунке 2-2 (при расчётах выбирался режим, в котором для данной длины основания затвора частота f_t была максимальна).

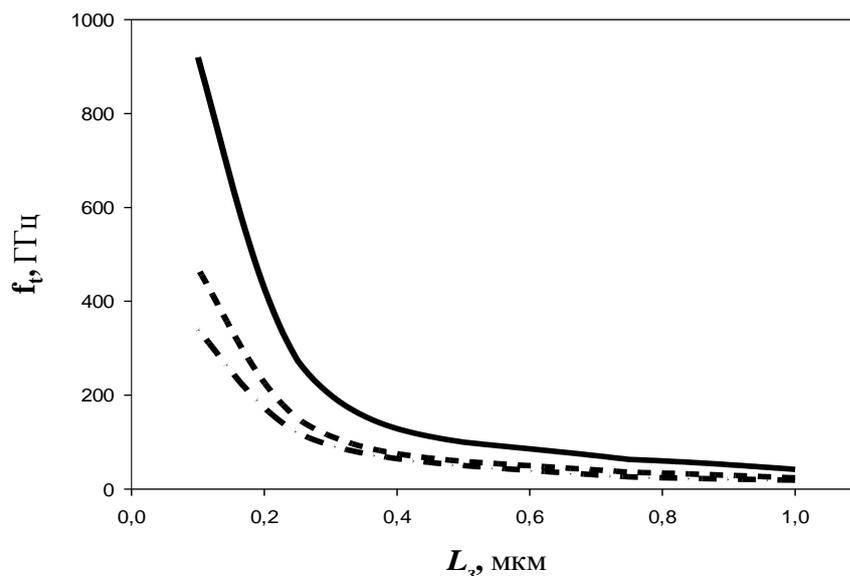


Рис. 2-2. Зависимость максимальной частоты усиления по току от длины основания затвора транзистора. (—) GaAs при $\mu = 8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, (- - -) GaAs при $\mu = 1700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, (— · — · —) GaN при $\mu = 1700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Видно, что в транзисторах на основе GaAs даже при искусственном задании подвижности в слабом поле $\mu = 1700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, максимальная частота усиления по току несколько больше, чем в транзисторах на основе GaN. При задании слабополевой подвижности $\mu = 8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ в GaAs транзисторах и при задании $\mu = 1700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ в транзисторах на основе GaN, разница в поведении транзисторов становится достаточно велика (более чем в 2 раза при больших, и почти в 3 раза при малых длинах затвора), что противоречит выводам, следующим из сравнения только величин максимумов на полевых зависимостях статических скоростей электронов в GaAs и в GaN. Это легко понять, если сравнить варианты распределений дрейфовой скорости по длине канала, получаемые при задании таких же величин слабополевой подвижности (рисунок 2-3).

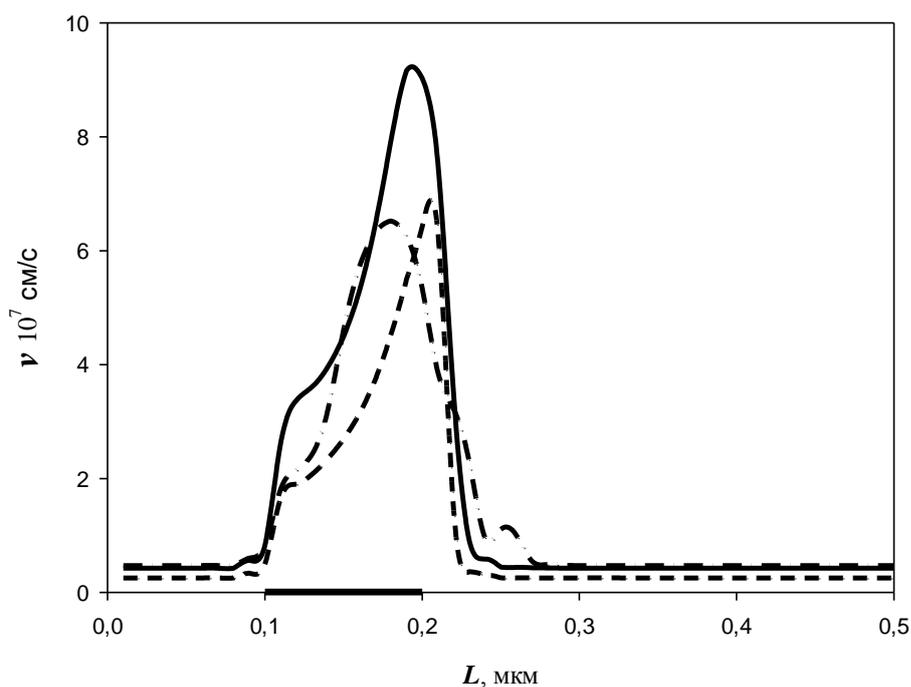


Рис. 2-3. Распределения дрейфовой скорости электронов в GaAs каналах (—) при $\mu = 8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, (- - -) при $\mu = 1700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и в GaN каналах (— · —) транзисторов. Координаты затвора: $0,1 \div 0,2 \mu\text{м}$.

Видно, что, несмотря на более низкие величины статической дрейфовой скорости в максимуме ее полевой зависимости, величина в максимуме ее

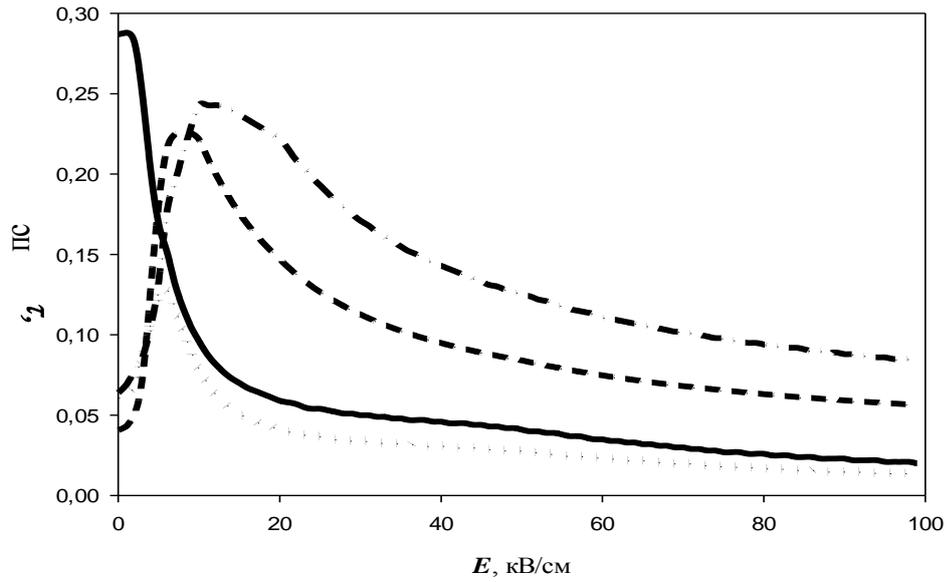
распределения в канале GaAs транзистора даже чуть больше, чем аналогичная величина в канале GaN транзистора (рисунок 2-3). При этом распределения скоростей по длине канала отличаются весьма значительно. Распределения дрейфовой скорости в канале GaAs транзистора при искусственном задании в канале разной величины слабополевой подвижности электронов, похожи по форме.

Видно, что при дрейфе в подзатворной области канала GaAs транзистора электроны быстро разгоняются до скоростей, существенно превосходящих статическую величину дрейфовой скорости в максимуме ее полевой зависимости, а далее их скорость продолжает заметно увеличиваться. В максимуме распределения по длине канала (рисунок 2-3) дрейфовая скорость электронов в несколько раз превосходит статическую величину дрейфовой скорости в максимуме ее полевой зависимости при задании как высокой, так и низкой величины слабополевой подвижности. Надо отметить, что при задании низкой величины слабополевой подвижности эффект превышения проявляется даже сильнее (для объемного материала отношение максимальной скорости под затвором к статической величине дрейфовой скорости в максимуме ее полевой зависимости становится больше), но величина средней дрейфовой скорости под затвором оказывается меньше.

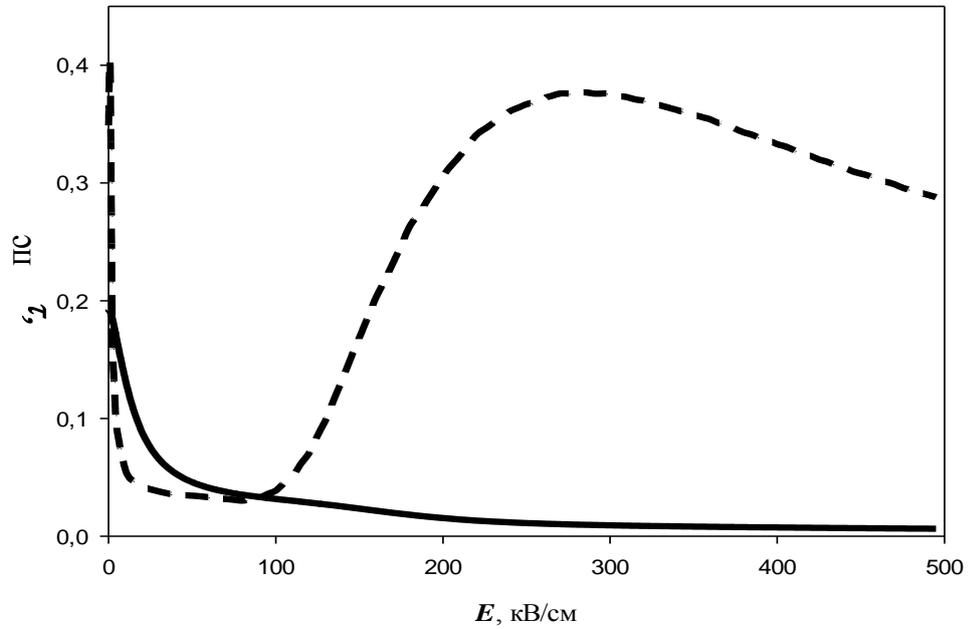
В GaN транзисторе при дрейфе в подзатворной области канала электроны приобретают дрейфовую скорость, которая примерно соответствует началу заметного полевого падения подвижности $((1,5 \div 2) \cdot 10^7 \text{ см/с})$, затем эта скорость медленно увеличивается и примерно под серединой затвора достигает своего максимального статического значения. Потом начинается область всплеска дрейфовой скорости (в максимуме всплеска она в два раза превосходит статическую величину дрейфовой скорости в максимуме полевой зависимости) а затем, еще под затвором, начинается резкое уменьшение. Эта особенность также существенно отличает распределение дрейфовой скорости в канале GaN транзистора от распределения в канале транзистора на основе GaAs – там падение дрейфовой скорости начинается только под стоковым краем затвора.

По величине максимальной дрейфовой скорости под затвором полевой транзистор на основе GaN мало уступает прибору на основе GaAs даже при задании малой подвижности в последнем. На первый взгляд, GaN транзистор может даже превосходить GaAs транзистор (например, из-за большей статической величины дрейфовой скорости в максимуме ее полевой зависимости на рисунке 2-1а). Однако, давно известно, смотри, например, [147-149], что при субмикронных длинах затвора, максимальная частота усиления определяется не максимальной величиной дрейфовой скорости под затвором, а временем пролёта электронов под затвором, причем в область изменения проводимости канала существенный вклад вносят области, примыкающие к подзатворным. Следует отметить, что при квазидвумерном моделировании краевые и другие существенно двумерные эффекты учитываются лишь приближённо. Однако, с учетом того, что в модели транзистора толщина активного слоя много меньше длины затвора, это не должно сильно менять полученные качественные соотношения. Разница в величинах средней дрейфовой скорости под затвором (определяющей время пролёта электронов под затвором) и приводит к тому, что транзистор на основе GaAs имеет большую максимальную частоту усиления по току, (смотри рисунок 2-2), при задании как малой, так и большой величины слабополевой подвижности электронов.

Для пояснения полученных результатов (рисунок 2-3) рассмотрим зависимость времен релаксации кинетической энергии и импульса от величины напряженности электрического поля в GaN и GaAs (рисунок 2-4), используемых в гидродинамической модели, построенной на основе выражений (2-1)÷(2-3).



(a)



(б)

Рис. 2-4. Зависимость времен релаксации импульса τ_p и энергии τ_ε от величины напряженности электрического поля. (а): GaAs $\mu = 8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ τ_p (—), $\tau_\varepsilon/10$ (- - -), GaAs $\mu = 1700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ τ_p (· · · · ·), $\tau_\varepsilon/10$ (— · — · —). (б): GaN τ_p (—), τ_ε (- - -).

Видно, что сильнее всего в GaAs и GaN различаются времена релаксации энергии. Причем при напряженности электрического поля $E < 100 \text{ кВ/см}$ время

релаксации энергии в GaN даже меньше времени релаксации по импульсу. Столь большое различие во временах релаксации, по-видимому, объясняется разницей в энергии оптических фононов ($\hbar\omega \approx 92$ мэВ в GaN, $\hbar\omega \approx 36$ мэВ в GaAs), вносящих основной вклад в потерю энергии при неупругих столкновениях, что в свою очередь связано с разницей в массах входящих в данные полупроводники атомов. При этом стоит отметить, что из-за большей эффективной массы время релаксации импульса электронов в GaN существенно больше, чем в GaAs с той же подвижностью.

Дополнительную информацию дает рассмотрение не просто зависимости времен релаксации от напряженности электрического поля, а их распределения по длине канала транзистора, показанные на рисунке 2-5.

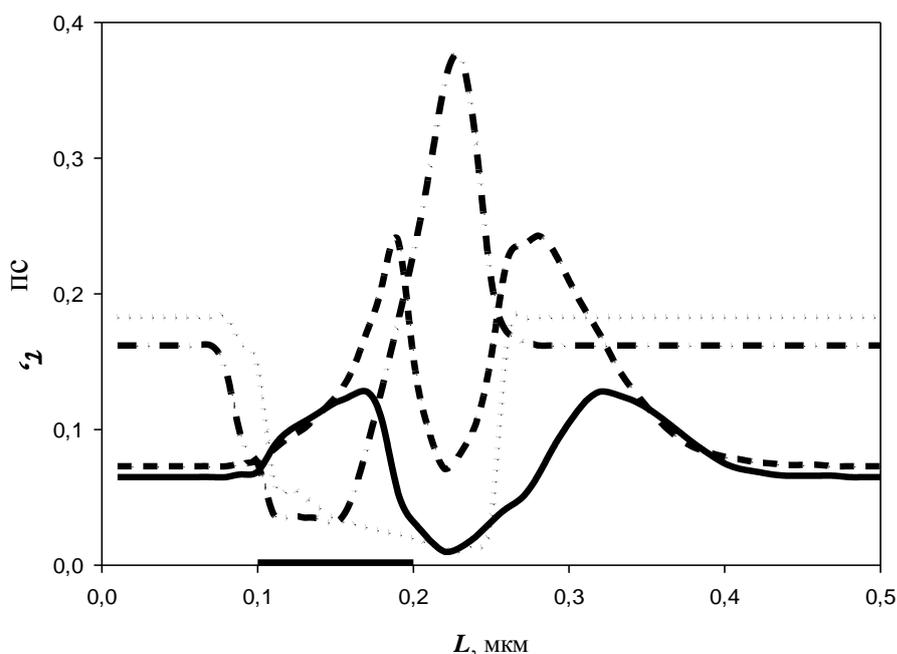


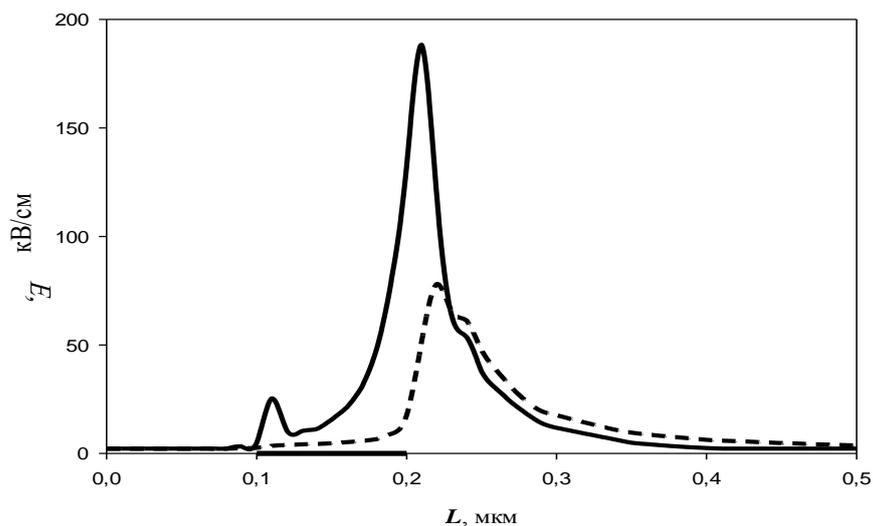
Рис. 2-5. Распределения времён релаксации по длине канала. Для GaAs ПТШ: $\mu = 1700$ см²/(В·с), τ_p (—), $\tau_\epsilon/10$ (- - -). Для GaN ПТШ: τ_p (· · · · ·), τ_ϵ (— · —). Координаты затвора: 0,1 ÷ 0,2 мкм.

Видно, что в транзисторе на основе GaN время релаксации энергии электронов при их влете в область сильного поля под затвором практически мгновенно становится очень маленьким, в то время как в транзисторе на основе GaAs оно на порядок больше. Далее под стоковой частью затвора электроны

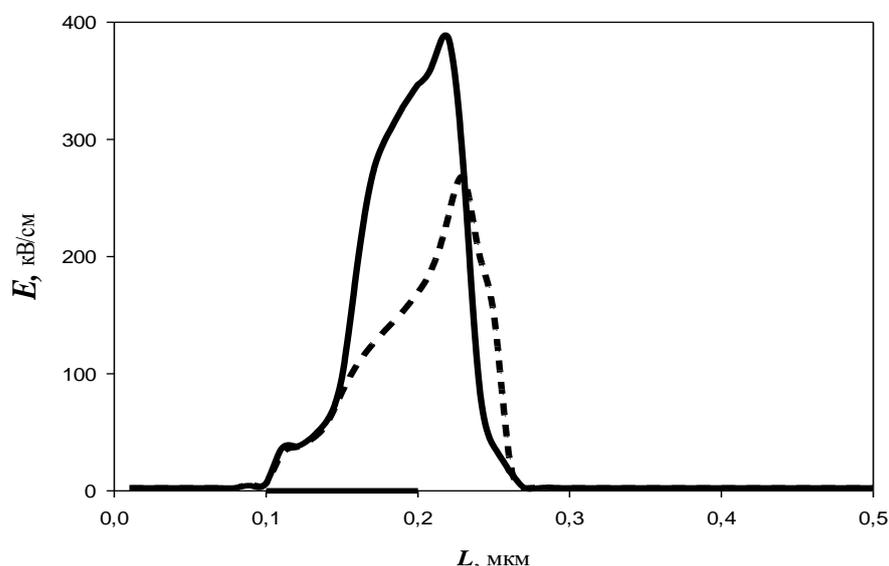
разогреваются и время релаксации сильно растет. Именно в этой области канала и наблюдается всплеск дрейфовой скорости в транзисторе на основе GaN. Не менее интересно также рассмотреть распределения по длине каналов GaN и GaAs транзисторов напряженностей электрического поля и величин $E(\varepsilon)$ – напряженностей электрического поля, соответствующего распределению кинетической энергии электронов по длине канала (смотри рисунок 2-б). Видно, что в канале транзистора на основе GaN в области малых времен релаксации энергии, распределения этих величин практически совпадают, различия начинаются как раз там, где время релаксации энергии начинает расти с координатой, в то время как в канале GaAs транзистора различия этих величин существенны под всем затвором. Надо отметить еще один важный момент: под истоковым краем затвора GaAs транзистора напряженность электрического поля невелика и даже если бы транспорт электронов не имел особенностей, связанных с нелокальными эффектами, для таких полей времена релаксации энергии весьма велики. Кроме того всплеск дрейфовой скорости у стокового края затвора приводит к тому, что домен сильного поля локализуется у стокового края затвора и в области за ним.

В транзисторе на основе GaN у истокового края затвора поля тоже не слишком велики и их величина как раз соответствует минимальным значениям времени релаксации по энергии. Это приводит к отсутствию всплеска дрейфовой скорости и как следствие, домен сильного поля втягивается в подзатворный участок канала от стокового края затвора примерно до середины длины затвора.

По существу, складывается следующая ситуация: под затвором GaAs транзистора $V_{GaAs} \approx \mu(\varepsilon) \cdot E \neq \mu(E_S) \cdot E_S$ - здесь мы наблюдаем существенно нелокальный разогрев электронов. При влёте под затвор и почти до половины длины затвора прибора на основе GaN $V_{GaN} \approx \mu(\varepsilon) \cdot E \approx \mu(E_S) \cdot E_S$ - здесь разогрев электронов практически локализован. Не менее, а возможно еще более наглядно, выявленные закономерности проявляются при больших длинах затвора.



(а)



(б)

Рис. 2-б. Распределения напряжённости электрического поля (—), и напряженности статического электрического поля $E(\epsilon)$, соответствующей энергии электронов « ϵ » (- - -) в канале транзистора. (а): GaAs $\mu = 1700 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, (б): GaN $\mu = 1700 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Координаты затвора: $0.1 \div 0.2 \text{ мкм}$.

Из расчетов следует, с уменьшением длины затвора, относительная разница в величине максимальной частоты усиления по току увеличивается. Этот рост разницы в быстродействии как раз и объясняется увеличением влияния нелокальных эффектов при уменьшении длины затвора. В то же время

традиционно считается, что при длинном затворе (около 1 мкм) нелокальные эффекты малы, а дрейфовая скорость электронов под затвором близка к скорости насыщения (или к скорости в сильном поле). Следовательно, делается вывод, что в этом случае транзистор на GaN должен иметь преимущество, по крайней мере перед транзистором на GaAs с низкой подвижностью. Однако даже при длине затвора 1 мкм быстродействие GaAs транзистора с искусственно заданной низкой величиной слабополевой подвижности больше, чем у транзистора на основе GaN. Поэтому имеет смысл сравнить распределения дрейфовой скорости в таких приборах не только при коротких, но и при достаточно длинных затворах. Результаты вычисления этих распределений приведены на рисунке 2-7.

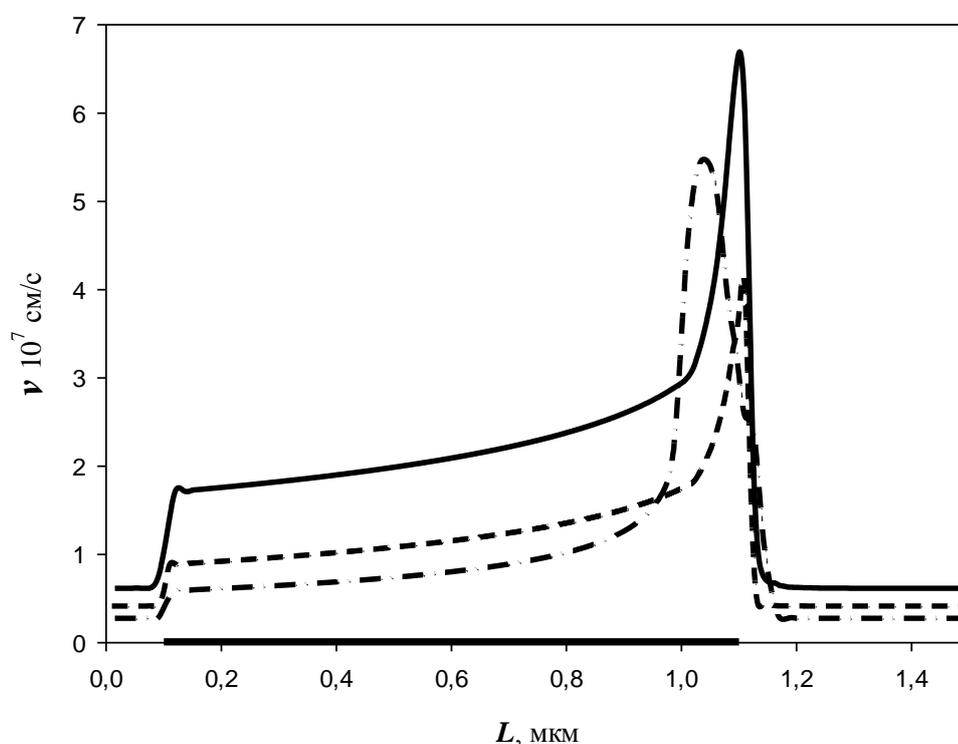


Рис. 2-7. Распределения дрейфовой скорости электронов в каналах GaAs транзисторов. Координаты затвора 0,1÷1,1 мкм. (—) $\mu = 8000$ см²/В·с (- - -) $\mu = 1700$ см²/В·с и GaN (— · — · —) $\mu = 1700$ см²/В·с.

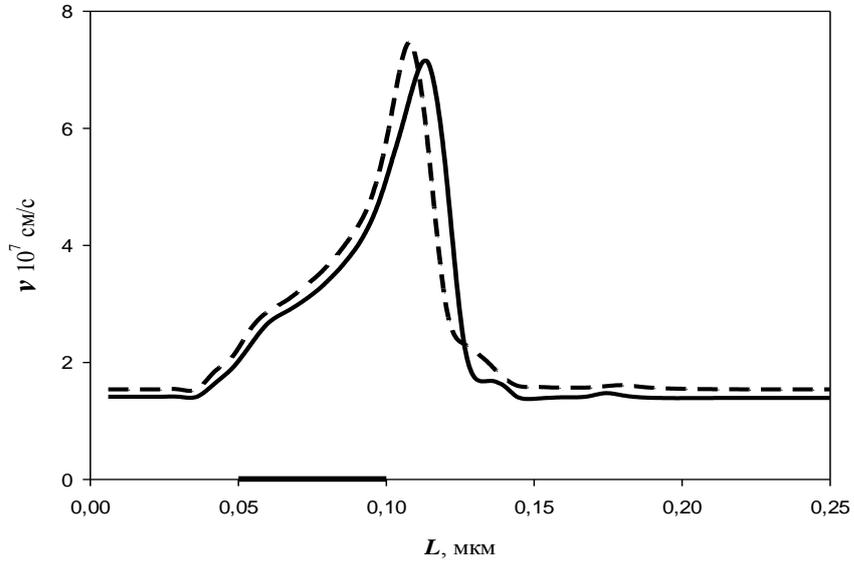
Из результатов, приведенных на рисунке 2-7 видно, что представления о насыщении дрейфовой скорости в канале транзистора с длинным затвором и ее равенстве скорости электронов в сильных полях не имеют никакого отношения к

наблюдаемой на практике ситуации (аналогичные результаты были получены и анализировались ранее в работе [150]). Действительно, при длинных затворах в транзисторах на основе арсенида галлия, несмотря на специально заданную, очень низкую для такого материала, подвижность электронов, наблюдается хорошо выраженный всплеск дрейфовой скорости, причём очень сильный (по всей видимости, это особенность структуры с таким профилем легирования). Правда такой сильный всплеск наблюдается на длинах порядка 0,1 мкм в области статического домена и не оказывает сильного влияния на характеристики прибора. Однако, как показали результаты расчётов, в транзисторе на основе арсенида галлия при заданной подвижности электронов $\mu = 8000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ относительно более слабый всплеск дрейфовой скорости с незначительным превышением максимальной статической скорости электронов имеет место под большей частью затвора. В то же время, в транзисторе на основе нитрида галлия, всплеск дрейфовой скорости тоже наблюдается в узкой области длиной менее 0.2 мкм, фактически в статическом домене, а вне этой области практически везде дрейфовая скорость электронов существенно меньше, чем в GaAs транзисторе.

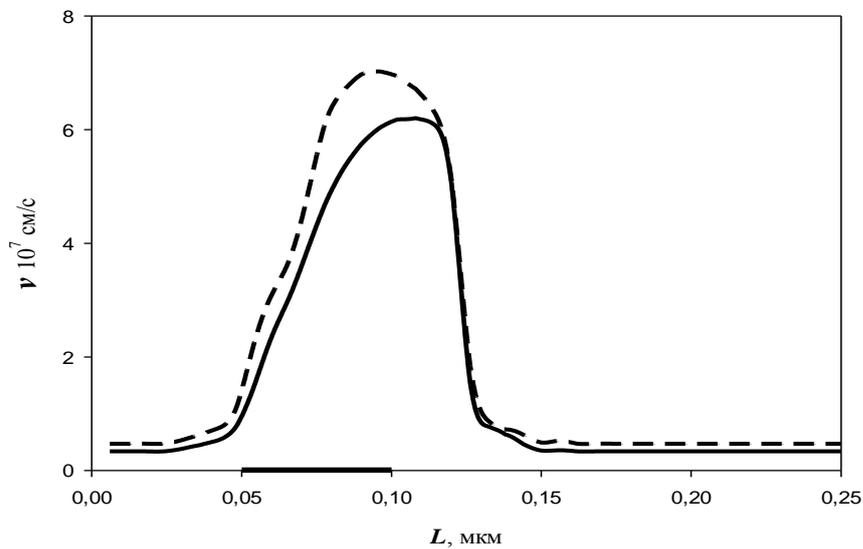
Следует отметить важный момент: область достаточно большого всплеска дрейфовой скорости в GaN транзисторе заметно шире, а величина скорости в ней заметно больше чем в GaAs транзисторе с заданной низкой подвижностью $\mu = 1700 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, а распределение скорости в этой области очень похоже по форме и величине на распределение в области всплеска при длине затвора 0.1 мкм. По-видимому, именно особенности зависимости времени релаксации от энергии и от напряженности электрического поля и приводят к тому, что в транзисторе на основе GaN всплеск скорости происходит практически одинаково, как при микронной, так и при субмикронной длине затвора.

Малые времена релаксации по энергии приводят еще к одному интересному и в определенной мере полезному (в плане моделирования) эффекту - в транзисторах на основе GaAs температурные модели становятся малоприменимы уже при длине затвора менее величины $\cong 0.25 \text{ мкм}$ [127].

В транзисторах с GaN каналом даже при сравнительно малой длине затвора, равной 0.05 мкм, распределения дрейфовой скорости электронов в канале, полученные в гидродинамическом и в температурном приближениях, различаются между собой слабо (смотри рисунок 2-8).



(a)



(б)

Рис. 2-8. Распределения дрейфовой скорости электронов в канале *GaN* транзистора. В гидродинамической модели (—), в температурной модели (- - -). (a) – при внешнем потенциале на затворе 0.2 В, (б) – при внешнем потенциале на затворе -0.6 В. Координаты затвора 0.05÷0.1 мкм.

Видно, что в отличие от полученных ранее результатов [127,145], для транзисторов на основе более узкозонных эпитаксиальных структур распределения дрейфовой скорости в GaN канале в гидродинамической и температурной моделях отличаются незначительно во всех режимах работы. При этом разница в величинах токов стока, текущих через транзисторы, в величинах крутизны и максимальной частоты усиления по току при такой длине затвора может достигать 20% (при длине затвора 0.1 мкм относительная погрешность в этих величинах менее 10%, а разница в распределениях дрейфовой скорости по длине канала прибора вообще незначительна). Следует отметить, что в общем случае при расчетах характеристик транзисторов с длинами затворов менее 0.1 мкм, желательно использовать модели, основанные на решении кинетического уравнения.

Различия результатов расчетов полученные в гидродинамической и в температурной моделях, скорее всего связаны не только с малым временем релаксации энергии электронов в GaN, но и с существенно большей эффективной массой электронов в этом материале. По существу, в транзисторах с GaN каналом практически снимается вопрос о точности гидродинамической и температурной моделей – они дают близкие результаты вплоть до длин затворов, примерно равных 0.05 мкм.

2.2. ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ DA-pHEMT ГЕТЕРОСТРУКТУР

Особенности pHEMT транзисторов на основе гетероструктур с донорным легированием.

Ещё недавно мощные GaAs СВЧ транзисторы типа pHEMT были основным элементом устройств сантиметрового и миллиметрового диапазонов, и поэтому во всем мире активно велись исследования, направленные на улучшение параметров мощных СВЧ транзисторов, таких как выходная мощность, коэффициент усиления и коэффициент полезного действия [127-130]. Характеристики гетероструктурных полевых транзисторов определяются многими факторами: длиной затвора, параметрами гетероструктуры, топологией, конкретным технологическим маршрутом изготовления и т.д. Однако при прочих равных условиях (одинаковой длине и сопротивлении затвора, сравнимых паразитных элементах и т.д.) именно оптимальная конструкция и высокое качество гетероструктуры, определяющие основные электрофизические характеристики pHEMT- структуры, такие, как холловская подвижность электронов μ_e , интегральная поверхностная концентрация квазидвумерного электронного газа в InGaAs канале n_s , позволяют получить наилучшие характеристики СВЧ приборов. Необходимо отметить, что обеспечение больших величин слабополевой холловской подвижности μ_e не является однозначной гарантией получения больших токов стока при прочих равных условиях.

Действительно, характерной особенностью работы мощного полевого транзистора является работа на участках насыщения выходных вольт - амперных характеристик (ВАХ), где основными являются сильнополевые эффекты: эффекты всплеска и насыщения дрейфовой скорости. Поэтому разработка оптимальных конструкций транзисторных гетероструктур на основе различных материалов должна сопровождаться детальными исследованиями переноса горячих электронов [151-153].

В современных серийно выпускаемых рНЕМТ транзисторах объемное легирование используется редко - проводится планарное дельта-легирование донорами слоя, выращиваемого над слоями спейсера и канала что позволяет получить большие величины μ_e и n_s . Для достижения еще большей проводимости канала, для увеличения ширины динамического диапазона и линейности транзисторов, используется двойное (двухстороннее) дельта-легирование структуры донорной примесью. При таком легировании дельта-слои примеси формируются в процессе роста структуры как выше, так и ниже слоя канала, при обязательном введении промежуточных слоев нелегируемых спейсеров (в ДрНЕМТ структурах). Как правило, в таких структурах внутри матрицы из GaAs, после остановки выращивания слоя нижней стенки матрицы формируется тонкий дельта-слой донорной примеси (обычно это слой Si), далее проводится процесс роста слоя верхней стенки GaAs матрицы. Этот дельта-слой является источником, поставляющим доноры в слои GaAs-матрицы, расположенные выше и ниже дельта-слоя. Такое легирование донорами происходит в результате совместного действия механизмов диффузии и сегрегации доноров, поэтому фактически, при дельта-легировании донорами, происходит объемное легирование донорами GaAs слоев, расположенных выше (верхняя стенка GaAs-матрицы) и ниже (нижняя стенка GaAs-матрицы) донорного дельта-слоя [152]. Характерные толщины стенок матрицы, при которых примесь доноров остается локализованной только в пределах матрицы, следующие. При плотности доноров $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ практически оптимальными являются такие толщины: верхней стенки матрицы – не менее 5 монослоев, нижней стенки матрицы – не менее 3 монослоев GaAs. Для GaAs толщина одного монослоя составляет 0.283 нм, поэтому при такой плотности доноров усредненная по толщине GaAs-матрицы максимальная объемная концентрация доноров составляет $2,21 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Эта величина существенно превосходит максимальную величину объемной концентрации доноров, равную $(4 \div 5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для слоя $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$, которая достижима в обычной технологии объемного легирования донорами, при которой примесь доноров вводится непрерывно в процессе роста слоя. При необходимости использования

сравнительно толстых слоев с объемным легированием донорами увеличивается глубина собственной потенциальной ямы донорного слоя, что при достаточно больших толщинах спейсера приводит к локализации заметной части электронов в этой яме. Следствием этого эффекта является появление параллельного дополнительного проводящего канала по донорному слою и результирующее уменьшение холловской подвижности электронов.

По этой причине в более поздних вариантах технологий рНЕМТ транзисторов, технология дельта-легирования донорами, отделенными нелегированными спейсерами от слоя InGaAs канала, практически полностью вытеснила аналогичную технологию объемного легирования слоев AlGaAs. Конечно, при использовании технологии дельта-легирования донорами, помимо использования оптимально малых толщин стенок GaAs матриц, допустимо и полезно использовать совместимые с физикой работы транзистора и с технологией выращивания структур дополнительные методы подавления миграции примесей из матриц.

Для решения задачи увеличения подвижности электронов в транзисторных структурах также типичным стало введение небольшой (обычно, на уровне 15-20% от содержания Ga) добавки индия в слой GaAs канал. Это решение увеличивает как холловскую подвижность электронов в канале - за счет уменьшения эффективной массы и интенсивности их рассеяния, так и поверхностную плотность электронов, локализованных в InGaAs-канале при равновесных условиях - за счет увеличения перепада положения дна зоны проводимости на гетеропереходе «канал – спейсер» или на гетеропереходе «канал – сглаживающий слой». Хотя такие структуры несколько уступают по величинам подвижности μ_e и поверхностной плотности двумерного электронного газа n_s структурам, полученным на подложках фосфида индия InP, но благодаря отработанной технологии и более низким ценам GaAs - подложек, по сравнению с InP - подложками, в настоящее время они являются более распространенными.

В соответствии с простейшей оценкой [2] выходная мощность транзистора, работающего в «А» режиме усиления, пропорциональна произведению

максимальной амплитуды СВЧ тока стока на максимальную амплитуду СВЧ напряжения между стоком и истоком. Поэтому для получения максимальной величины удельной выходной СВЧ мощности, в гетероструктурах для мощных полевых транзисторов обычно стремятся добиться максимума проводимости канала за счет максимально возможного увеличения произведения слабополевой (холловской) подвижности и поверхностной плотности электронов. Так как при задании фиксированного расстояния от контакта Шоттки до канала рост поверхностной плотности электронов в канале приводит к росту напряжения перекрытия, и соответственно к уменьшению КПД [150], то производство подвижности электронов на их поверхностную плотность стремятся увеличивать в основном за счет увеличения подвижности в слабых электрических полях. Попытки оптимизации гетероструктур для мощных полевых транзисторов, направленные на увеличение подвижности при достаточно большой поверхностной плотности электронов, сталкиваются с большим набором жестких физических и технологических ограничений [150]. Таким образом, за многие годы работы с легированными донорами гетероструктурами для мощных pHEMT транзисторов на основе GaAs, был найден почти оптимальный состав слоев и уровень легирования примесью доноров. Примечательно, что апробация большого количества сильно различающихся вариантов топологий конструкции серийных транзисторов на основе дельта - легированной донорами AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктуры не дала большой разницы в величине удельной выходной СВЧ мощности - на частоте 10 ГГц получалась примерно одинаковая для всех вариантов топологий удельная выходная мощность, примерно равная $1,0 \div 1,2$ Вт/мм [150,152].

Вероятно, это обстоятельство оказалось одной из основных причин, по которым максимум научной активности сместился в область исследований и разработки транзисторов на основе гетероструктур из более широкозонных материалов, например, таких как SiC, GaN, позволяющих получать существенно увеличенные поверхностные плотности электронов в канале и напряжения пробоя, хотя и при значительном снижении подвижности.

Однако более тщательный анализ процессов, определяющих работу транзисторов на участке насыщения выходных ВАХ, показывает, что, псевдоморфные AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктуры далеко не исчерпали все свои возможности. Дело в том, что в рНЕМТ транзисторе на основе правильно спроектированной дельта - легированной донорами AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктуры холодные электроны практически полностью локализованы в слое InGaAs канала. В условиях сильного полевого разогрева, типичного для работы транзисторов, характер процесса переноса электронов по каналу от истока к стоку качественно изменяется. Благодаря большой энергии, приобретаемой от внешнего электрического поля, происходит делокализация горячих электронов из слоя InGaAs канала. Их движение теперь захватывают не только слой InGaAs канала, но вместе с ним и значительную часть более широкозонных слоев GaAs и AlGaAs, выращенных ниже и выше канала. Следствием этого процесса является присутствие значительной части горячих электронов в AlGaAs слоях, т.е. при разогреве электронов происходит межслоевой поперечный перенос электронов, причем этот перенос имеет классический (точнее квазиклассический) характер. Присутствие горячих электронов в AlGaAs слоях отрицательно сказывается на величине сильнополевой дрейфовой скорости. Стационарная и СВЧ динамика переноса горячих электронов становится сложной, особенно при необходимости учета в квантовой яме (КЯ) слоя канала размерно-квантовых эффектов и многослойности AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктур. В частности, в таких структурах ток стока, текущий через транзистор, определяется не только слабополевой подвижностью электронов, но и всплеском дрейфовой скорости, характерным для горячих электронов под затвором. Величина всплеска дрейфовой скорости зависит как от слабополевой подвижности электронов, так и от величин поперечных потоков горячих электронов, от интенсивности рассеяния электронов в слоях GaAs и AlGaAs, особенно при положительных напряжениях на затворе транзистора [153,154]. Величины поперечных потоков из квантовой ямы InGaAs канала в более широкозонные слои AlGaAs и обратно, зависят от положения нижнего квантового уровня в квантовой яме, от величины разрывов

зон на границах гетероперехода, потенциального рельефа дна зоны проводимости в широкозонном материале и других факторов. Очевидно, что при сильном разогреве электронов, характерном для работы транзистора на участке насыщения выходных ВАХ, рНЕМТ транзистор на основе дельта - легированной донорами AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктуры именно в результате поперечного переноса горячих электронов из слоя канала существенно теряет свои НЕМТ-преимущества.

По этой причине становится не менее очевидным, что дальнейший прогресс в области развития рНЕМТ транзисторов может быть связан с такой модификацией AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктур, при которой существенно подавляется межслоевой поперечный перенос горячих электронов из InGaAs канала в обрамляющие его слои GaAs и AlGaAs. Для этого, оставаясь в рамках эпитаксиальных технологий AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктур, можно ограничить поперечный перенос горячих электронов из канала с помощью потенциальных барьеров, максимально локализующих горячие электроны в слое канала. В дополнение, оптимизируя параметры квантовой ямы InGaAs канала и толщины спейсеров, можно добиться того, чтобы только минимальная часть горячих электронов находилось в слоях GaAs и AlGaAs, обрамляющих InGaAs канал и имела возможность интенсивного рассеяния на потенциале донорной примеси.

Особенности DA-DpНЕМТ транзисторов на основе гетероструктур с донорно-акцепторным легированием

Предлагаемый метод позволяет достаточно легко увеличить максимально достижимый ток стока в транзисторе, однако максимально сильное подавление рассеяния горячих электронов на потенциале доноров и усиленная локализация горячих электронов в слое InGaAs канала, могут быть обеспечены только при формировании в структуре достаточно высоких потенциальных барьеров с малой длиной нарастания. Использование для усиления локализации горячих электронов в канале структур AlGaAs-InGaAs-GaAs барьеров на гетеропереходах не дает

нужного эффекта, так как величина перепада дна зоны проводимости ΔE_C в гетеропереходе $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ (на котором в принципе, можно сформировать локализирующий барьер), при повышении содержания алюминия до допустимого предела увеличивается недостаточно сильно. Для гетероперехода $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ величина ΔE_C имеет следующие зависимости от величины доли алюминия [155]:

$$\text{При } x \geq 0.41 : \Delta E_C = 0.475 - 0.335x + 0.143x^2, \quad \Delta E_V = -0.46x,$$

$$\text{При } x \leq 0.41 : \Delta E_C = 0.79x, \quad \Delta E_V = -0.46x.$$

Очевидно, что горячие электроны с энергией около 0,5 эВ такой барьер удержать не сможет. Кроме этого, если при построении локализирующих барьеров придется вынужденно использовать легированные донорами слои $Al_xGa_{1-x}As$ с большим содержанием алюминия ($x > 0,35$), то в них формируются глубокие DX центры, захватывающие электроны, и происходит инверсия долин в зоне проводимости [156], что резко усиливает интенсивность рассеяния горячих электронов, проникающих в слои $Al_xGa_{1-x}As$ [157].

Чтобы исключить эти проблемы, приемлемое решение для построения дополнительных потенциальных барьеров, локализирующих горячие электроны в слое канала, можно искать на пути использования донорно-акцепторного легирования [158], формируя при этом необходимые барьеры с помощью встроенных *pin*-структур, конечно, при избыточном легировании донорами. Об увеличении потенциального барьера между слоем канала гетероструктуры и подложкой за счет объемного легирования буферного слоя, формируемого на подложке, акцепторами известно давно (смотри [2], стр. 312), использовалась также и встроенная *pin*-структура [159]. Важно отметить недостатки этих решений: при объемном легировании буфера акцепторами, использованном в [2], потенциальный барьер обладает сравнительно большой длиной нарастания, что соответственно практически не подавляет рассеяние на донорах и приводит к возникновению дополнительного канала рассеяния горячих электронов - на акцепторах. Поэтому использование объемного легирования буферного слоя

акцепторами [2] не оказывает заметного положительного влияния на параметры прибора. Встроенная со стороны подложки *pin*-структура [159] более продвинута в идеологическом плане – за счет введения *i*-слоя подавляется рассеяние горячих электронов на акцепторах, но большая толщина этого слоя практически не приводит к ослаблению рассеяния горячих электронов на потенциале доноров.

Для увеличения дрейфовой скорости горячих электронов предложено: в исходной *Dp*HEMT гетероструктуре с двухсторонним донорным дельта – легированием методом эпитаксии из молекулярных пучков и легирования акцепторами, сформировать в слоях $Al_xGa_{1-x}As$, контактирующих с легированными донорами GaAs матрицами, достаточно высокие локализирующие *pin* - барьеры. При этом для максимального ослабления рассеяния горячих электронов на потенциале донорной примеси при формировании локализирующих барьеров обеспечивается по возможности малая длина нарастания высоты барьера (автоматически и малая толщина *i*-слоя, характерная толщина которой составляет 4÷7 нм) при достаточно большой высоте барьеров (0,6÷0,8 эВ). Естественно, для этого требуется использование достаточно высоких уровней легирования акцепторами (на уровне $5.0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) и донорами (на уровне $(7 \div 10) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$).

Схематическая зонная диаграмма разработанной структуры с донорно-акцепторным легированием слоев *pin* - барьеров (*DA-Dp*HEMT) показана на рисунке 2-9, где сокращение «КЯ» обозначает квантовую яму.

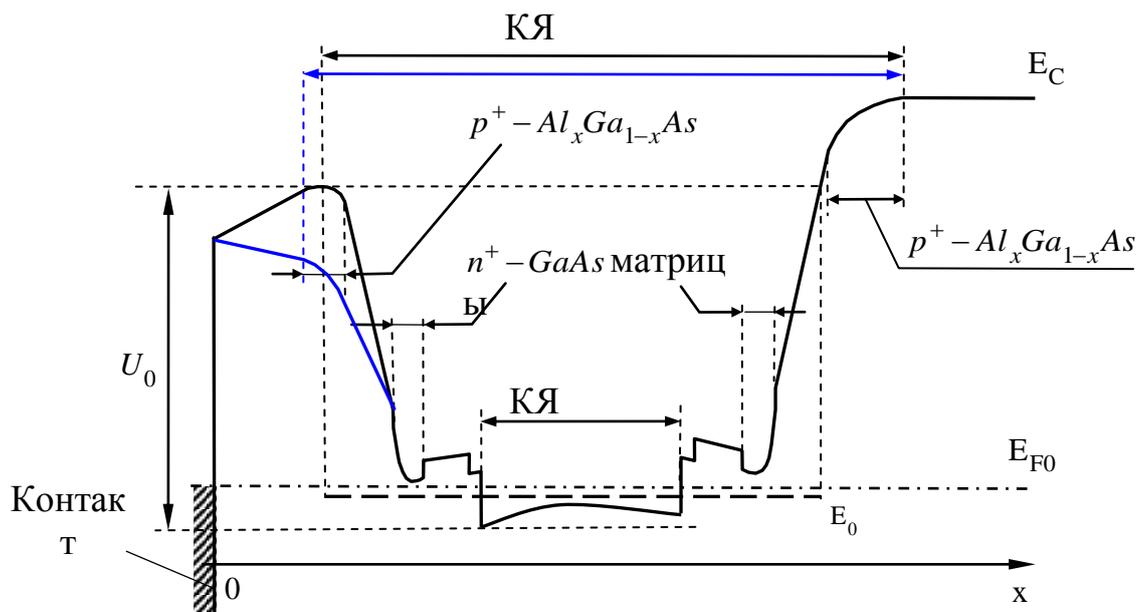


Рис. 2-9. Схематическая зонная диаграмма DA-DpHEMT – структуры с контактом Шоттки. Синий цвет – вид измененной зонной диаграммы после одинакового уменьшения величины концентрации верхних акцепторов и доноров.

На рисунке 2-9 показано расположение слоев с объемным легированием акцепторами и GaAs матриц, залегированных донорами в результате введения в них дельта - слоев донорной примеси. E_0, E_{F0} - нижний размерно-квантовый уровень полной энергии и равновесный уровень Ферми.

DA-DpHEMT гетероструктура в принципе может дать следующие преимущества перед DpHEMT с донорным дельта-легированием:

7. 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.
8. Увеличение поверхностной плотности электронов в КЯ структуры.
9. Уменьшение интенсивности рассеяния горячих электронов за счет возникновения сильного эффекта размерного квантования в КЯ структуры.
10. Уменьшение туннельного тока «затвор – квантовая яма структуры» при обратном смещении на затворе за счет возможности увеличения толщины потенциального барьера между затвором и квантовой ямой структуры.

11. Уменьшение надбарьерного тока «квантовая яма структуры - затвор» при прямом смещении на затворе за счет существенного увеличения напряжения отпираания диодной *Sh-i-p-i-n* – структуры, сформированной между затвором и InGaAs каналом.
12. 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 запираания канала.

Расчеты показывают, что высоты локализирующих потенциальных барьеров квантовой ямы структуры могут достигать ширины запрещенной зоны в широкозонном слое $Al_xGa_{1-x}As$, при этом потенциальный рельеф в области барьеров изменяется на нескольких нанометрах, а поверхностная плотность электронов в канале может быть задана более $5,0 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$. В структурах без локализирующих барьеров, в КЯ канала обычно находится всего один квантовый уровень, который расположен достаточно близко к вершине этой ямы. Выше КЯ канала находится практически непрерывный спектр разрешенных энергетических состояний с расстоянием между уровнями менее 1 мэВ, что заметно меньше средней энергии всех видов оптических фононов. Поэтому в обычных структурах с донорным легированием горячие электроны с кинетической энергией больше глубины квантовой ямы канала испытывают все виды рассеяния, т.е. практически как в объемном материале. Размерное квантование в таких структурах имеет место только в узком (порядка $0,1 \div 0,2$ эВ) диапазоне энергий КЯ канала и на электронном транспорте сильно разогретых (с приобретенной энергией порядка $0,2 \div 0,7$ эВ) электронов практически никак не сказывается [162]. В DA-DpHEMT гетероструктуре встроенные высокие локализирующие потенциальные барьеры существенно меняют ситуацию, при их встраивании в структуру формируется дополнительная квантовая яма – квантовая яма структуры (рисунок 2-9) с существенно большей глубиной U_0 . Используя в *pin* - структурах достаточно высокие уровни легирования, можно обеспечить малую длину нарастания локализирующих барьеров. Как показывает численное решение системы из

уравнений Шредингера и Пуассона в равновесном статическом случае (когда в транзисторе нет токов) в типичных квантовых ямах DA-DpHEMT структуры, образованных локализующими потенциальными барьерами, оказывается всего лишь 10÷15 размерно-квантовых уровней с расстояниями между ними около 50 мЭв. Эта энергия превышает энергию оптических фононов в InGaAs ($\hbar\omega \approx 35$ мЭв). Поэтому можно предположить, что для зоны проводимости КЯ структуры интенсивность рассеяния горячих электронов заметно уменьшится из-за размерно-квантовых особенностей спектра разрешенных состояний в пространстве импульсов. Действительно, количество возможных состояний для квазиимпульсов $\vec{p}_x = \hbar\vec{k}_x$, которые в принципе могут иметь и в которые могут быть рассеяны горячие электроны, находящиеся в узкой и глубокой КЯ, становится существенно меньше. Это величина b/a_x вместо величины $(L_x \square L_y)/a_x$, где « a_x » - постоянная кристаллической решетки в направлении x , « b » - ширина квантовой ямы (рисунок 2-10). Дополнительно к этому, уменьшение рассеяния может происходить из-за влияния специфического вида функции $|\psi(\vec{p}_x)|^2$, принципа запрета Паули, законов сохранения импульса и энергии на количество возможных и наиболее вероятных актов рассеяния. Действительно, вероятность нахождения электронов в разрешенных состояниях для импульсов в узкой размерно-квантовой КЯ меняется. Вместо непрерывного набора равновероятных разрешенных состояний для импульсов $\vec{p}_x, \vec{p}_y, \vec{p}_z$, в ней формируется дискретный набор наиболее вероятных разрешенных состояний (соответствующих максимумам функции $|\psi(\vec{p}_x)|^2$), имеющих вид 2D дисков с квазинепрерывным спектром равновероятных импульсов \vec{p}_y, \vec{p}_z (рисунок 2-10).

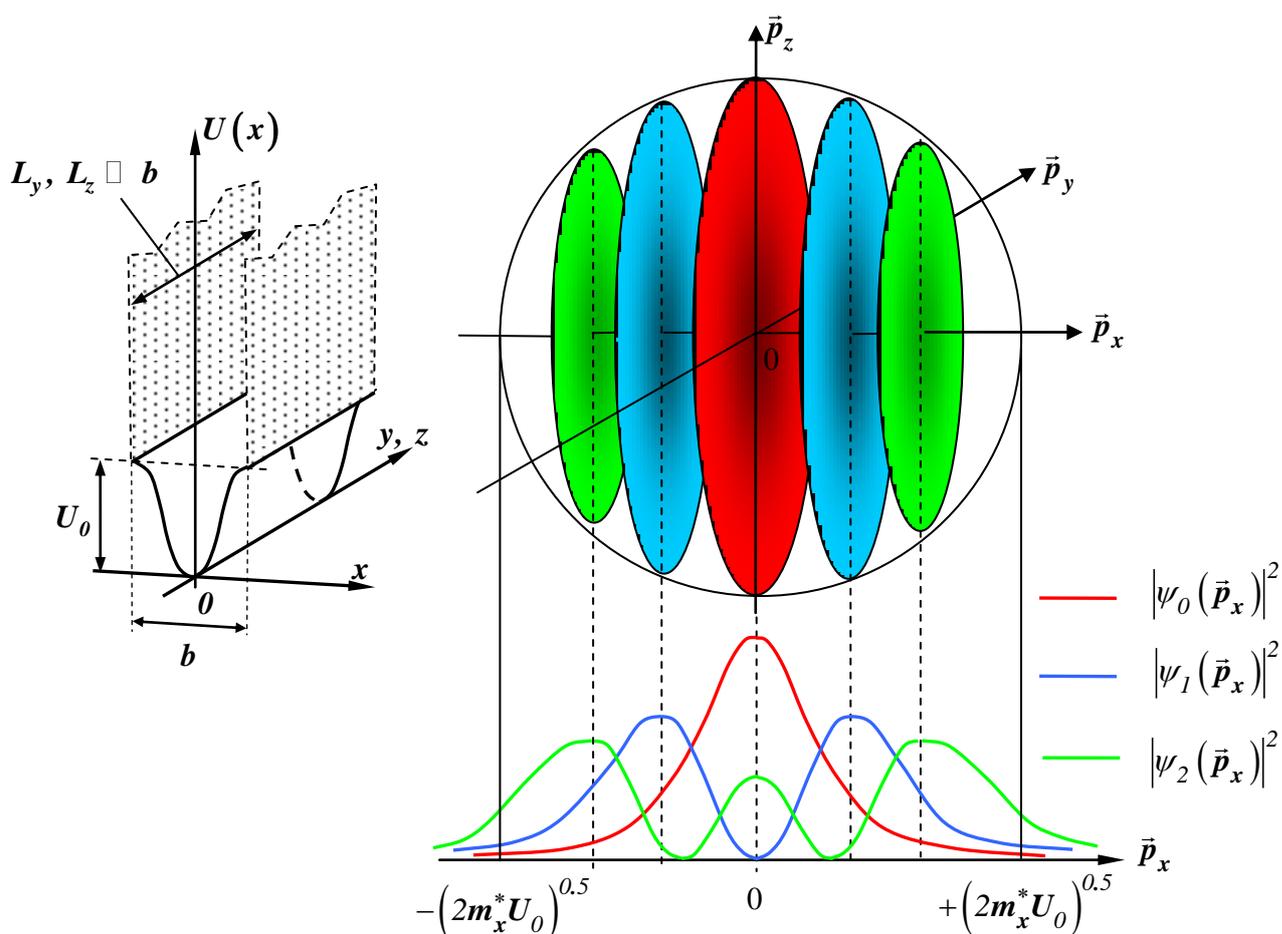


Рис. 2-10. Слева: пример квазидвумерной КЯ в координатном пространстве. Справа: состояния в пространстве импульсов квазидвумерной КЯ, имеющие максимальную вероятность заполнения электронами зоны проводимости при сильном размерном квантовании в направлении x -оси координат и \vec{p}_x -оси импульсов.

На рисунке 2-10 в виде цветных дисков показан набор состояний для трех нижних размерно-квантовых подзон пространства импульсов.

В высоких локализирующих потенциальных барьерах огибающая волновой функции $\psi(x)$ даже для достаточно горячих электронов быстро уменьшается по модулю, так что большая часть этих электронов оказывается локализованной в области слоя InGaAs канала.

В DA-DpHEMT гетероструктурах эффективная толщина слоев GaAs и AlGaAs, в которых могут находиться горячие электроны в квантовой яме структуры, оказывается уменьшенной из-за соотношения толщины слоя InGaAs канала с суммарной толщиной GaAs матриц, сглаживающих слоев, AlGaAs

спейсеров и длин нарастания высот локализирующих барьеров. Потенциал донорной примеси из-за большой (единицы и даже десятки нм) длины экранирования, в принципе, может оказывать сильное влияние на рассеяние электронов. Действительно, он присутствует даже в слое InGaAs канала, поэтому эффект размерного квантования позволяет снизить вероятность рассеяния горячих электронов, находящихся в пределах не только квантовой ямы структуры, но и в пределах квантовой ямы канала (рисунок 2-9).

Как следует из вышесказанного, гетероструктуры с донорно - акцепторным легированием могут иметь много преимуществ перед традиционными рНЕМТ структурами. Вполне вероятно, что они могут иметь и недостатки. В частности, один недостаток достаточно очевиден – за возможность построения высоких локализирующих потенциальных барьеров с малой длиной нарастания и необходимость избыточного (по отношению к акцепторам) легирования донорами приходится расплачиваться заметным увеличением плотности доноров в структуре, что в принципе, может привести к усилению рассеяния горячих электронов на потенциале доноров. По отдельности, влияние многих из перечисленных факторов – невелико (по оценкам на уровне от единиц до нескольких десятков процентов), однако они будут оказывать совокупное влияние, взаимодействовать как между собой, так и с другими физическими механизмами. Достаточно точно описать все особенности, и, тем более, оценить, как весь этот комплекс факторов, особенно с учетом различных взаимосвязей, будет влиять на выходные характеристики прибора, представляется весьма затруднительным.

Решить эту проблему может или достаточно точный расчет, или проведение детальных экспериментальных исследований. Точный расчёт транзистора с субмикронным затвором на основе DA-DpНЕМТ гетероструктуры тоже выглядит крайне проблематичным. Известно, что наиболее точно характеристики приборов с характерными размерами порядка десятых долей микрона рассчитываются методом Монте-Карло [159,2], а различные модификации гидродинамических моделей [161-164], которыми обычно пользуются для расчета транзисторов, при

субмикронных длинах основания затвора и при сложных гетероструктурах обычно малоприменимы [154]. Однако, модификации метода Монте-Карло под конкретную задачу расчета DA-DpHEMT транзисторов, насколько нам известно, пока не существует. Более того, пока неясно, достаточно ли для решения подобных задач использовать классическое кинетическое уравнение, а все особенности, связанные с сильным размерным квантованием отнести к интегралу столкновений (при расчете вероятностей рассеяния с учетом реальных волновых функций электронов в каждом поперечном сечении транзистора), или потребуются более точное квантовомеханическое описание.

Кроме того, при изготовлении таких структур может иметь место ряд технологических проблем, которые могут заметно сказаться на динамике электронов, а вводить в расчет чисто технологические особенности, особенно при решении кинетического уравнения, всегда бывает крайне затруднительно.

2.3. АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ УЛУЧШЕНИЕ ВЫХОДНЫХ СВЧ ХАРАКТЕРИСТИК DA-DpHEMT ТРАНЗИСТОРОВ

2.3.1. Модели традиционных гетероструктур, описывающие нелокальный разогрев электронов

Основные уравнения гидродинамической модели для многодолинного полупроводника, получаемые путем интегрирования по импульсной переменной кинетического уравнения Больцмана [165,166], имеют вид:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \vec{\nabla} n_i \vec{v}_i = I_{ni} \quad (2-5a)$$

$$\frac{\partial m_i n_i \vec{v}_i}{\partial t} + \vec{\nabla} m_i n_i \vec{v}_i^2 = q \vec{E} n_i - I_{pi} - \vec{\nabla} n_i k_B T_i \quad (2-5b)$$

$$\frac{\partial n_i \varepsilon_i}{\partial t} + \vec{\nabla} v_i n_i \varepsilon_i = q \vec{E} n_i v_i - I_{\varepsilon i} - \vec{\nabla} Q_i - \vec{\nabla} n_i v_i k_B T_i \quad (2-5b)$$

В выражениях (2-5): q , \vec{v}_i , ε_i , T_i – заряд, скорость, энергия и температура электронов в соответствующей i – долине, \vec{E} – напряженность электрического поля, \vec{Q}_i – поток тепла, вызванный переносом кинетической энергии между электронами (теплопроводностью электронного газа), I_{ni} , I_{pi} , $I_{\varepsilon i}$ гидродинамические генерационно - релаксационные члены в уравнениях для концентрации электронов, их импульса и энергии в каждой из долин, связанные с интегралом столкновений в кинетическом уравнении Больцмана, k_B – постоянная Больцмана.

В частности, полная гидродинамическая модель полевого транзистора для двумерного варианта описана в работе [167].

В настоящее время широко используются квазигидродинамические (их еще часто называют «температурные») модели – упрощенные варианты системы (2-5),

при которых в уравнении (2-5б) инерционным членом $\frac{\partial m_i n_i \vec{v}_i}{\partial t} + \vec{\nabla} m_i n_i \vec{v}_i^2$

пренебрегают, полагая его равным нулю. Таким образом, в таких температурных моделях дрейфовая скорость электронов мгновенно следует за полем, а ее

величина пропорциональна их подвижности, зависящей только от энергии. (Более точно к «температурной модели» приводится система (2-5), если в ней интегрирование по всем импульсам электронов и введение средней кинетической энергии электронов проведено с использованием функции распределения Максвелла для электронов). Используются модели, в которых как учитывается различный разогрев электронов в каждой из неэквивалентных долин зоны проводимости [128,162], так и не учитывается, т.е. полагается, что $i = 1$ [168-170] (тем самым вводится понятие одной «эффективной» долины).

Пренебрежение слагаемым $\frac{\partial m \vec{v}}{\partial t}$, описывающим ньютоновскую динамику движения электронов с учетом их инерционности, не сказывается на точности расчетов при характерных временах рассматриваемых процессов много больше времени релаксации электронов по импульсу $t \gg \tau_p$. Для GaAs, InP, InGaAs - слоев канала в подзатворной области транзистора $\tau_p \leq 10^{-13}$ с, а длина релаксации импульса электронов составляет $l_p \approx 0.01 \div 0.05$ мкм. Однако в этих материалах времена релаксации импульса зависят от энергии электронов, которая в сильных полях может заметно меняться на расстояниях, примерно равных величине l_p . В работе [171] было показано, что пренебрежение слагаемым, описывающим ньютоновскую динамику движения электронов с учетом их инерционности, может существенно сказываться на точности расчетов на временных интервалах, в несколько раз превосходящих времена релаксации электронов по импульсу. Применительно к полевым транзисторам [171] это длины затвора менее 0,4 мкм (показано, что фактически, погрешность возникает при длине затвора около 0,25 мкм). Важно, что в полевых транзисторах на гетероструктурах с селективным легированием, подвижности и концентрации электронов заметно выше, чем в обычных транзисторах, которые упомянуты в [171]. Кроме того, транзисторы с селективным легированием донорами обладают еще одной очень важной особенностью – в них большую отрицательную роль играет поперечный пространственный перенос электронов из слоя канала в широкозонные слои, его окружающие. Независимо от длины затвора,

характерные поперечные размеры толщины слоя канала малы по сравнению с длиной релаксации импульса, а незначительное изменение энергии электронов может заметно сказываться на проводимости структуры (заселенность канала электронами сильно зависит от их энергии).

Исследуем влияние этих факторов на разницу в результатах расчетов при использовании гидродинамической и температурной моделей.

2.3.2. Описание гидродинамической модели

Система уравнений для гетероструктуры, описывающая динамику электронов с учетом нелокальных и диффузионных эффектов с генерационно-релаксационными членами в приближении времен релаксации имеет вид [172-174]:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \vec{\nabla} n_i \vec{v}_i = n_i \sum_{j=1, j \neq i}^p \frac{1}{\tau_{ij}} + \sum_{j=1, j \neq i}^p \frac{n_j L_j}{\tau_{ij} L_i} \quad (2-6a)$$

$$\frac{\partial m_i n_i \vec{v}_i}{\partial t} + \vec{\nabla} m_i n_i \vec{v}_i^2 = q \vec{E} n_i - \frac{m_i n_i \vec{v}_i}{\tau_{pi}} - \frac{2}{3} \vec{\nabla} \left[n_i \left(\varepsilon_i - \frac{1}{2} m_i \vec{v}_i^2 \right) \right] - \quad (2-6б)$$

$$- n_i m_i \vec{v}_i \sum_{j=1, j \neq i}^p \frac{1}{\tau_{ij}} + \sum_{j=1, j \neq i}^p \frac{n_j m_j v_j L_j}{\tau_{ij} L_i} \quad (2-6в)$$

$$\frac{\partial n_i \varepsilon_i}{\partial t} + \vec{\nabla} n_i \vec{v}_i \varepsilon_i = q n_i \vec{E} \vec{v}_i - n_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_0}{\tau_{\varepsilon i}} - \frac{2}{3} \vec{\nabla} \left[n_i \vec{v}_i \left(\varepsilon_i - \frac{1}{2} m_i \vec{v}_i^2 \right) \right] -$$

$$- \vec{\nabla} Q_i - n_i \varepsilon_i \sum_{j=1, j \neq i}^p \frac{1}{\tau_{ij}} + \sum_{j=1, j \neq i}^p \frac{n_j \varepsilon_j L_j}{\tau_{ij} L_i} \quad (2-6в)$$

Здесь p - число долин как в узкозонном, так и в широкозонном полупроводниках (для простоты рассмотрения учитываются по две неэквивалентные долины в каждом слое гетероперехода, $p = 4$), $L_{i,j}$ - толщины слоев.

Сложение стационарной и безразмерной формы уравнений сохранения числа частиц (2-6а), импульса (2-6б) и энергии (2-6в) почленно для каждого слоя, образующего гетеропереход, дает следующее. Далее введены обозначения:

$$n_{\Gamma 1} / \tau_{\Gamma 1 \Gamma 2} + n_{L 1} / \tau_{L 1 L 2} = n_1 / \tau_1, \quad v_1 = (v_{\Gamma} n_{\Gamma} + v_L n_L) / (n_{\Gamma} + n_L), \quad n = n_{\Gamma} + n_L,$$

$m^* = (m_{\Gamma} n_{\Gamma} + m_L n_L) / n$, и сделана замена обозначений:

$$m_{\Gamma} \vec{v}_{\Gamma} n_{\Gamma} + m_L \vec{v}_L n_L = m^* \vec{v} n, \quad (2-7)$$

$$\varepsilon_{\Gamma} \vec{v}_{\Gamma} n_{\Gamma} + \varepsilon_L \vec{v}_L n_L = \varepsilon \vec{v} n \quad (2-8)$$

В уравнениях (2-6) гидродинамические времена релаксации для каждого слоя структуры, образующего гетеропереход, имеют следующие выражения:

$$\tau_p(\varepsilon) = \frac{m^*(\varepsilon) v_s(\varepsilon)}{q E_s(\varepsilon)} \quad (2-9)$$

$$\tau_\varepsilon(\varepsilon) = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{q E_s(\varepsilon) v_s(\varepsilon)} \quad (2-10)$$

Пренебрегая теплопроводностью электронного газа и диффузионными эффектами в продольном направлении, получаем (смотри подробнее [172-176]):

$$\frac{\partial n_1 v_1}{\partial x} = -\frac{n_1}{\tau_1(\varepsilon_1)} + \frac{n_2 L_2}{\tau_2(\varepsilon_2) L_1} \quad (2-11a)$$

$$\frac{\partial n_2 v_2}{\partial x} = -\frac{n_2}{\tau_2(\varepsilon_2)} + \frac{n_1 L_1}{\tau_1(\varepsilon_1) L_2} \quad (2-11б)$$

$$v_1 \frac{\partial m_1^* v_1}{\partial x} = q \left(E - E_{s1} \frac{v_1}{v_{s1}} \right) + \frac{n_2 L_2}{n_1 \tau_2 L_1} (m_2^* v_2 - m_1^* v_1) \quad (2-11в)$$

$$v_2 \frac{\partial m_2^* v_2}{\partial x} = q \left(E - E_{s2} \frac{v_2}{v_{s2}} \right) + \frac{n_1 L_1}{n_2 \tau_1 L_2} (m_1^* v_1 - m_2^* v_2) \quad (2-11г)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial x} = q \left(E v_1 - E_{s1} v_{s1} \right) + \frac{\varepsilon_1 - \tilde{\varepsilon}_1}{\tau_1} + \frac{n_2 L_2}{n_1 \tau_2 L_1} (\tilde{\varepsilon}_2 - \varepsilon_1) \quad (2-11д)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_2}{\partial x} = q \left(E v_2 - E_{s2} v_{s2} \right) + \frac{\varepsilon_2 - \tilde{\varepsilon}_2}{\tau_2} + \frac{n_1 L_1}{n_2 \tau_1 L_2} (\tilde{\varepsilon}_1 - \varepsilon_2) \quad (2-11е)$$

В уравнениях (2-11) и далее, все обозначения для узкозонного и широкозонного слоев гетероперехода аналогичны. Индекс «1» относится к узкозонному, а индекс «2» – к широкозонному слою гетероперехода, $v_s(\varepsilon)$, $E_s(\varepsilon)$ – статические значения дрейфовой скорости электронов и напряженности электрического поля, соответствующие некоторой кинетической энергии электронов ε .

В системе уравнений (2-11) учтено, что электрон, переходящий через потенциальный барьер, переносит энергию $\tilde{\varepsilon}$, отличную от средней кинетической энергии электрона в слое, где он находился (это средние энергии ε_1 и ε_2).

При выводе уравнений (2-11) также было учтено, что междолинные переходы $L_2 \rightarrow \Gamma_1$ и $\Gamma_1 \rightarrow L_2$ маловероятны, а диффузионные эффекты в транзисторах без встроенных продольных неоднородностей концентрации,

например, в виде самосовмещенного затвора, – несущественны (смотри, например, [176]).

Уравнения температурной модели выводятся из системы (2-11) при задании $m_1^* = m_2^* = 0$, что эквивалентно устранению учета уравнения, описывающего динамику изменения импульса. В этом случае уравнения (2-11в, г) сводятся к выражениям (где $\mu_{1,2}$ – подвижность электронов в узкозонном и широкозонном слоях гетероперехода):

$$v_1 = \frac{E \cdot v_{s1}(\varepsilon_1)}{E_{s1}(\varepsilon_1)} = \mu_1(\varepsilon_1) \cdot E \quad (2-12a)$$

$$v_2 = \frac{E \cdot v_{s2}(\varepsilon_2)}{E_{s2}(\varepsilon_2)} = \mu_2(\varepsilon_2) \cdot E \quad (2-12б)$$

При построении квазидвумерного варианта гидродинамической модели, основанной на системе уравнений (2-11), параметры канала (ширина квантовой ямы, эффективная высота барьера, энергии дна размерно – квантовых подзон и т.д.) задаются и определяются в приближении треугольной потенциальной ямы. Все необходимые обозначения величин приведены на рисунке 2-11. В этой модели как один из основных физических механизмов, в обязательном порядке учитывается поперечный перенос горячих электронов между слоями, образующими гетеропереход [172]. Именно учет поперечного пространственного переноса электронов и определяет квазидвумерный характер используемой модели, которая по своей сути является одномерной моделью, описывающей изменение всех интересующих нас величин только по одной координате. Это координата «х», направление оси которой параллельно плоскостям слоев в гетеропереходе и совпадает с направлением «исток – сток». Такой принцип построения модели позволяет одновременно обеспечить малую потребность модели в вычислительных ресурсах и получать наиболее важную для практических приложений информацию. Как показало сравнение с экспериментом и строгими самосогласованными расчетами, такое

квазидвумерное приближение обеспечивает вполне приемлемую для практических применений точность, смотри [177;178].

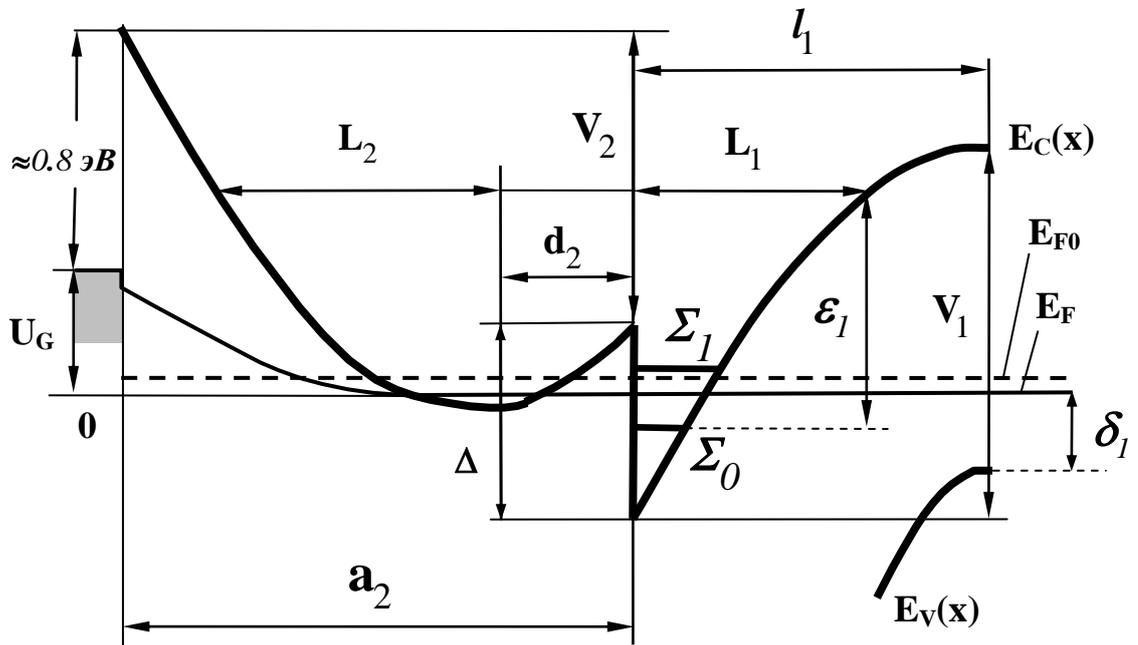


Рис. 2-11. Модельная зонная диаграмма структуры AlGaAs/GaAs с контактом Шоттки при обратном смещении на контакте.

С учетом обозначений, показанных на рисунке 2-11, система уравнений для описания электронов вблизи гетероперехода имеет вид:

$$\Sigma_i = \left(\frac{\hbar^2}{2m^*} \right)^{1/3} \left[\frac{3\pi}{2} q E_{y1} \left(i + \frac{3}{4} \right) \right]^{2/3}$$

$$E_{y1} = \frac{q}{\kappa_1} (n_s + N_{D1} l_1)$$

$$V_1 = \frac{q^2}{2\kappa_1} N_{D1} l_1^2 + \frac{2}{3} \frac{q}{\kappa_1 E_{y1}} \sum_i n_{si} \Sigma_i$$

$$n_{si} = \frac{m^* kT}{\pi \hbar^2} \ln [1 + \exp((E_F - \Sigma_i)/kT)] \quad (2-13)$$

$$\kappa_1 E_{y1} = \kappa_2 E_{y2}$$

$$E_F = V_2 - q(\varphi_B - U_g + \varphi(x)) + \Delta$$

$$V_1 = \Delta + V_2 + q(\varphi_B - U_g + \varphi(x)) + E_{g1} - \delta_1$$

$$V_2 = \frac{q^2}{2\kappa_2} \left[N_{D2} (a_2 - d_2 - h_\delta)^2 + N_{sp} (2a_2 - d_2) d_2 + n_2 (L_2^2 - 2L_2 a_2) + N_\delta (2a_2 - d_2 - h_\delta) h_\delta \right] - q E_{y2} a_2$$

На рисунке 2-11 и в уравнениях (2-13) приняты обозначения: $V_{1,2}$ – изгиб зон проводимости, Σ_i – собственные значения кинетической энергии электронов (соответствующей поперечной компоненте импульса), i – номер размерно – квантовой подзоны ($i=0, 1, \dots$), N_{D1} , N_{D2} – концентрации доноров в соответствующих материалах, N_{sp} – концентрация доноров в слое спейсера, l_1 , a_2 , d_2 – ширина потенциальной ямы для электронов в канале, широкозонного слоя, примыкающего к слою канала и спейсера, $\kappa_{1,2}$ – диэлектрическая проницаемость, n_{si} – поверхностная плотность электронов в размерно – квантовой подзоне с номером i , ($n_s = \sum_i n_{si}$), kT – тепловая энергия, E_F – энергия Ферми, φ_B – высота барьера Шоттки, U_g – напряжение на затворе, $\varphi(x)$ – распределение потенциала по продольной координате в канале транзистора, $E_{y1,2}$ – поперечные поля на границе гетероперехода, E_{g1} – ширина запрещенной зоны в узкозонном слое канала, δ_1 – положение дна валентной зоны относительно неравновесного уровня Ферми, Δ – величина перепада дна зоны проводимости на границе гетероперехода, L_2 – расстояние от границы гетероперехода на которое электроны с энергией ε_1 проникают в широкозонный материал, h_δ – толщина сильнолегированного слоя широкозонного материала у спейсера, N_δ – концентрация доноров в этом слое.

2.3.3. Модель гетероструктуры с сильной локализацией электронов в слое канала.

С момента первых разработок [179,180], гетероструктуры с селективным легированием (ГСЛ) выступают в двух основных качествах: как удобный объект для изучения свойств квазидвумерных систем [181] и как очень перспективный материал для полупроводниковых СВЧ приборов. Причём если в первом случае квазидвумерный электронный газ в таких структурах, особенно при низких температурах, демонстрирует все особенности, связанные с размерным квантованием, то в традиционных полевых транзисторах на НЕМТ гетероструктурах с селективным легированием, в рабочих режимах размерное квантование на дрейфе электронов практически не сказывается. Действительно, под затвором транзистора электроны сильно разогреваются, в результате чего они находятся в области квантовых уровней, расстояние между которыми составляет всего единицы мэВ, то есть по сути дела в области непрерывного спектра [182]. Поэтому преимущество НЕМТ транзисторов перед обычными приборами в основном обусловлено тем, что в них электроны с высокой концентрацией, соответствующей высокому уровню легирования, движутся по нелегированному узкозонному материалу с высокой подвижностью, а соответственно и с большим всплеском их дрейфовой скорости под затвором. Несмотря на это и на бурное развитие в последние годы нитрид-галлиевых технологий, гетероструктурные транзисторы на основе арсенида галлия и фосфида индия продолжают широко использоваться и демонстрировать рекордные характеристики [183-185].

Важной особенностью традиционных гетероструктур является интенсивный поперечный пространственный перенос электронов – их переход при разогреве из квантовой ямы слоя канала в широкозонный материал с низкой подвижностью носителей. По своей сути этот эффект является нежелательным и заметно ухудшает характеристики приборов [186]. Усиление влияния размерно-квантовых эффектов на электронный транспорт в канале транзистора и существенное уменьшение роли поперечного пространственного переноса стало возможно лишь с появлением DA-рНЕМТ структур [149,187], давших увеличение коэффициента

усиления (почти в два раза) и выходной мощности приборов (почти в полтора раза). Появился ряд идей в части усиления роли размерного квантования в таких структурах [188], так и в части уменьшения поперечного пространственного переноса из слоя канала [189], поэтому важно подробно исследовать комплекс этих вопросов.

Особенности основных вариантов транзисторных гетероструктур.

На первом этапе развития транзисторных гетероструктур [127,146,147, 190,191,192] было предложено и разработано три основных варианта конструкций с селективным легированием при различном расположении доноров (в виде δ -слоя или объемно легированного слоя) относительно канала транзистора:

- прямая структура – примесь доноров в широкозонном материале вводится между затвором и каналом (рисунок 2-12а);
- обращенная структура - примесь доноров в широкозонном материале вводится между каналом и подложкой (рисунок 2-12б);
- двойная гетероструктура - примесь доноров в широкозонном материале вводится в широкозонные слои выше и ниже слоя канала (по сути дела, это комбинация двух первых вариантов) (рисунок 2-12в).

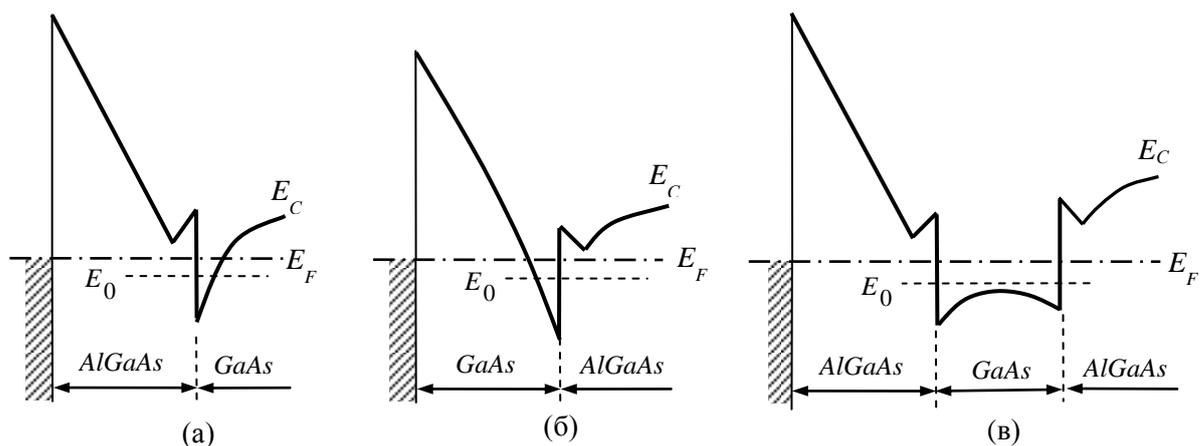


Рис. 2-12. Схематические зонные диаграммы основных вариантов структур с контактом Шоттки и $GaAs$ каналом: (а) - прямой НЕМТ – структуры, (б) - обращённой НЕМТ - структуры, (в) – двойной НЕМТ - структуры. Показан только нижний уровень размерного квантования E_0 .

При промышленном производстве транзисторов обычно используют два основных типа гетероструктур: для маломощных приборов - прямую гетероструктуру, для мощных - двойную. На начальных этапах развития транзисторных гетероструктур канал транзистора выращивали из GaAs, в настоящее время для улучшения характеристик применяют $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ канал, обычно при не слишком высокой мольной доле индия ($x \leq 0.2$) - для сохранения достаточно больших пробивных напряжений. В принципе, возможны различные варианты структур каждого типа, по существу не меняющие ситуацию. Например, в прямой структуре после $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ канала может формироваться слой GaAs, образуя на границе с каналом барьер высотой порядка 0.1 эВ, или в канал двойной гетероструктуры встраиваются тонкие вставки с повышенным содержанием In [193,194] и т.д. Благодаря таким особенностям, как близость канала к затвору и, как следствие, существенно увеличенная крутизна [195,196], обращенные гетероструктуры представлялись очень перспективными. Также для них характерно сужение квантовой ямы при увеличении отрицательного потенциала на затворе [188] и соответственно, увеличение разности энергии соседних размерно-квантовых уровней. Однако, несмотря на большое количество экспериментов, это направление гетероструктурных полевых транзисторов развития не получило. По-видимому, это связано с тем, что обращенная структура (рисунок 2-12б) имеет два существенных недостатка. Первый недостаток: при обратном смещении на затворе появляется возможность сильного туннелирования электронов из затвора в канал. Второй недостаток: продольный транспорт электронов по слою канала сопровождается их разогревом и поперечным переносом в область весьма большого по толщине слоя AlGaAs, где интенсивность рассеяния электронов велика, что приводит к резкому падению их дрейфовой скорости. Проблема интенсивного поперечного пространственного переноса электронов, а соответственно и усиления интенсивности рассеяния в сильных полях, может быть достаточно просто решена по аналогии с DA-pHEMT транзисторами [149,187,153] (рисунок 2-13а). Для этого в обращенной структуре ниже слоя канала можно сформировать дополнительный *pin* – потенциальный

барьер, а выше слоя канала - дополнительный широкозонный слой AlAs, формирующий потенциальный барьер над слоем канала [188] (рисунок 2-13б).

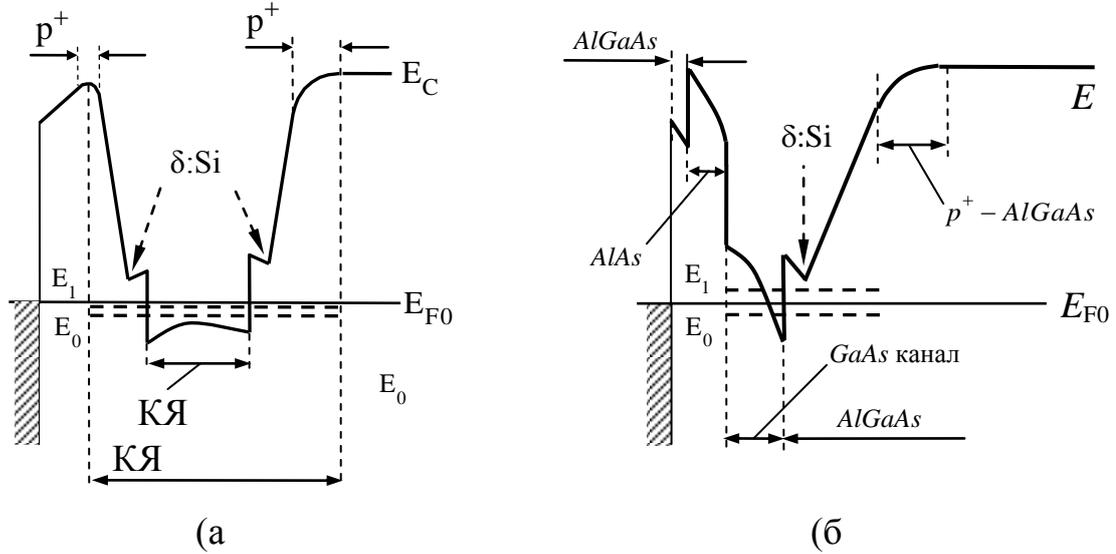


Рис. 2-13. Схематические зонные диаграммы структур с контактом Шоттки: (а) – DA-DpHEMT структуры, (б) - обращённой структуры с дополнительными слоями p^+ -AlGaAs и AlAs. Показаны два нижних размерных уровня E_0 и E_1 .

Кроме этого, в принципе, ничто не мешает увеличивать степень локализации электронов в квантовой яме (КЯ) канала за счет увеличения высоты барьеров гетеропереходов на границах слоя канала, например, за счёт увеличения содержания индия в слое канала. Однако при этом заметно уменьшается ширина запрещённой зоны в слое канала, и как следствие, пробивное напряжение таких приборов. В этом аспекте очень перспективным выглядит предложение [189] не увеличивать содержание индия, а выше и ниже слоя канала использовать другие материалы, например, $In_{0.2}Al_{0.8}As$. В гетеропереходе вида ($In_{0.2}Ga_{0.8}As$ -канал) – $In_{0.2}Al_{0.8}As$ перепад энергии дна зоны проводимости вырастает примерно до 0.5 эВ. На первый взгляд, это увеличение потенциального барьера малосущественно, так как оно составляет всего лишь около 0.2 - 0.15 эВ. Однако при этом происходит увеличение отсчитываемой от уровня Ферми эффективной высоты барьера в два – три раза, т.е. до величины, практически равной величине междолинного зазора. Такое увеличение эффективной высоты барьера на границах слоя канала может достаточно существенно сказаться на транспорте

горячих электронов под затвором транзистора. Наиболее перспективным выглядит одновременное увеличение не только перепада энергии дна зоны проводимости на гетерограницах слоя канала, но и построение с помощью донорно-акцепторного легирования дополнительных потенциальных барьеров, усиливающих локализацию горячих электронов в слое канала, что открывает новые возможности конструирования транзисторных гетероструктур с улучшенными характеристиками.

При современных темпах развития технологии достаточно сложно экспериментально проводить оперативный анализ сравнительной перспективности всего многообразия транзисторных структур. Поэтому для сравнения и выбора возможных вариантов конструкций структур представляет интерес проводить теоретические оценки. Как известно, современные полевые транзисторы имеют длины затвора порядка десятков нанометров [183-185]. Достаточно точно динамика электронов в таких транзисторах описывается на основе решения кинетического уравнения [197-199,122]. Как показывает опыт, для быстрых и простых оценок перспективности различных вариантов транзисторных структур часто бывает вполне достаточно анализа формы и величины всплеска дрейфовой скорости электронов, развивающегося во времени при включении ступенчатого или импульсного внешнего электрического поля [140-142].

Описание модели

Для расчёта всплеска дрейфовой скорости горячих электронов предлагается простая феноменологическая модель, предназначенная для анализа нелокального дрейфа носителей в транзисторных гетероструктурах, построенная с учетом поперечного пространственного переноса горячих электронов по аналогии с моделью [173]. В отличие от [173], в предлагаемой модели с идеализированным (бесконечно длинным) затвором включены возможности учета сильного размерного квантования в квантовой яме структуры и сложного потенциального рельефа в поперечном (по оси « x ») направлении, перпендикулярном поверхности структуры. Потенциальный рельеф и уровни размерного квантования для этого

направления определяются на основе численного самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона [188]:

$$-\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{m^*(x)} \frac{d\Psi_i(x)}{dx} \right) + U(x)\Psi_i(x) + E_x(x)\Psi_i(x) = E_i\Psi_i(x)$$

$$U(x) = E_{c0}(x) - q \cdot \varphi(x)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\kappa(x) \frac{d\varphi(x)}{dx} \right) = -\frac{\rho(x)}{\kappa_0} \quad (2-14)$$

$$E_x(x) = -\frac{q^2}{4\pi\kappa(x)\kappa_0} \left(\frac{3}{\pi} n(x) \right)^{\frac{1}{3}}$$

В выражениях (2-14) и далее введены следующие обозначения.

$\Psi_i(x)$ – огибающая i -ой собственной волновой функции, удовлетворяющая нормировке вида: $\int_0^{x_{max}} |\Psi_i(x)|^2 dx = 1$, E_i – собственные значения оператора

Гамильтона, $\varphi(x)$ – сумма встроенного и внешнего электрических потенциалов, $E_x(x)$ – обменная энергия электрона [200], $E_{c0}(x)$ – функция, задающая на гетерограницах и внутри структуры форму, величину и расположения перепадов потенциальной энергии, соответствующей электрическому потенциалу дна зоны проводимости в отсутствии свободных зарядов, $E_F \equiv 0$ – энергия Ферми при отсутствии внешнего смещения, при внешнем смещении функция $E_F(x)$, описывающая внешний электрический потенциал, входит в состав функции $\varphi(x)$, E_k – непрерывный спектр возможных величин кинетической энергии электронов в

зоне проводимости, $N_c(x) = 2 \left(\frac{2\pi m^*(x) k_B T_e}{(2\pi\hbar)^2} \right)^{1.5}$ – эффективная плотность состояний в

зоне проводимости, k_B – постоянная Больцмана, $N_D(x)$ и $N_A(x)$ – концентрации доноров и акцепторов [202], q – абсолютное значение заряда электрона, $\kappa(x)$, κ_0 – диэлектрическая проницаемость полупроводника и вакуума, $\vec{k}_x, \vec{k}_y, \vec{k}_z$ – волновые векторы, $m^*(x)$ – эффективная масса плотности состояний электрона в зоне

проводимости, $T_e = T_e(t)$ – температура газа электронов, определяемая динамикой изменения во времени кинетической энергии электронов ε , \hbar - постоянная Планка.

Для упрощения расчётов проводится пренебрежение поперечными надбарьерным и туннельным потоками электронов из структуры в затвор - при прямом смещении, из затвора в структуру - при обратном смещении (состояние равновесия во внешнем поперечном поле). Граничными условиями для решения уравнения Пуассона служит сумма величин встроенного и внешнего потенциала, задаваемая на контакте Шоттки $\varphi(x=0)$ и условие обращения в ноль величины напряженности электрического поля в глубине структуры (в координате $x = x_{max}$).

В диапазоне координат, где движение можно считать квазиклассическим (там $E_{k0}=0$), а также в области КЯ структуры выше последнего размерно-квантового уровня $(E_i)_{max}$ (там принимается равенство $E_{k0}=(E_i)_{max}$), энергетический спектр считается непрерывным, и плотность объёмного заряда электронов вычисляется по формуле:

$$\rho(x) = q(N_D(x) - N_A(x)) + \rho_c(x)$$

$$\rho_c(x) = -qn_c(x) = -q \cdot N_c(x) \cdot \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{E_k(x)} dE_k}{1 + \exp\left(\frac{E_k(x) - E_F}{k_B T_e}\right)} \quad (2-15)$$

Должна быть сделана важная оговорка. Всплеск дрейфовой скорости электронов может быть достаточно велик. Поэтому необходимо учитывать, что энергия носителей (в приближении максвелловской функции распределения) представляется в виде суммы двух слагаемых: условно «тепловой энергии» и

«кинетической энергии направленного движения» частиц: $\varepsilon = \frac{3}{2} k_B T_e + \frac{m^* V^2}{2}$

Для области КЯ структуры, в которой локализованы волновые функции размерно-квантовых подзон, в правой части уравнения Пуассона объемная концентрация $\rho(x)$ всех зарядов, задается следующими выражениями:

$$\rho(x) = q(N_D(x) - N_A(x)) + \rho_c(x) - q \sum_i n_i |\Psi_i(x)|^2$$

$$n_i = \left(\frac{m^*(x) k_B T_e}{\pi \hbar^2} \right) \ln \left\{ 1 + \exp \left[\frac{E_F - E_i}{k_B T_e} \right] \right\} \quad (2-16)$$

В выражениях (2-16) использование функции распределения в виде функции Ферми допустимо при малости относительного количества электронов, участвующих в поперечном потоке в затвор или из затвора. По этой причине в (2-16) последняя формула для концентрации n_i имеет место только для структур с достаточно глубокой КЯ, т.е. при выполнении условия $(E_i)_{max} \ll k_B T_e$.

Для анализа нелокального разогрева электронов используем метод, аналогичный методу, применённому в работе [173].

Составляем систему уравнений, описывающих изменение во времени дрейфового импульса $p_{dr}(t)$ и кинетической энергии $\varepsilon(t)$ в узкозонном слое канала и в обрамляющих его слоях более широкозонных полупроводников.

В отличие от метода [173], для систем с сильной локализацией электронов в слое канала и с сильным размерным квантованием более приемлемой выглядит форма описания, учитывающая вероятности нахождения электронов в различных слоях структуры. При описании динамики изменения энергии и импульса используем времена релаксации дрейфового импульса $\tau_p(\varepsilon)$ и кинетической энергии $\tau_\varepsilon(\varepsilon)$, входящие в систему уравнений, аналогичную системе [140].

Принимается, что динамика изменения времен релаксации импульса τ_p , энергии τ_ε и эффективной массы зависит от изменения во времени полной кинетической энергии $\varepsilon(t)$, включающей в себя x, y, z компоненты скорости электронов и компоненту кинетической энергии, связанную с дрейфовой скоростью $V(t)$:

$$\frac{\partial [m^*(\varepsilon(t)) \cdot V(t)]}{\partial t} = qE(t) - \frac{m^*(\varepsilon(t)) \cdot V(t)}{\tau_p(\varepsilon(t))}$$

$$\frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} = qE(t)V(t) - \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon_0}{\tau_\varepsilon(\varepsilon(t))} \quad (2-17)$$

Использование приближения времен релаксации дает возможность привязки к расчетным или экспериментально определённым характеристикам слоев структуры. В системе уравнений (2-17) и далее, введены обозначения: V , m^* – дрейфовая скорость и эффективная масса плотности состояний, усредненные по долинам, E – задаваемая источником питания напряженность продольного электрического поля, разогревающего электроны.

Введём вероятность нахождения электрона в соответствующем j - слое через поверхностную плотность электронов в нем:

$$p_j = \frac{n_S^j}{n_S}, \quad n_S^j = \int_{X_{j-1}}^{X_j} \rho_c(x) dx + \int_{X_{j-1}}^{X_j} n_i(x) dx \quad (2-18)$$

В выражениях (2-18) введены обозначения: n_S – суммарная по всем слоям поверхностная плотность свободных электронов. Для частоты рассеяния электронов « ν » во всех слоях структуры используем следующее простое модельное выражение, учитывающее вероятность нахождения электрона в слое с индексом « j »:

$$\nu = \sum_j \nu_j p_j \quad (2-19)$$

где ν_j - частота рассеяния в слое с индексом « j ».

Для трехслойной структуры, включающей в себя узкозонный канал с обрамляющими его одинаковыми широкозонными слоями, когда $j=2$, система уравнений с учетом вида зависимости времён релаксации (частот рассеяния) от энергии $\varepsilon(t)$ принимает следующий вид:

$$\frac{\partial (m^*(\varepsilon)V)}{\partial t} = q \left(E - \frac{m^*(\varepsilon)V \cdot (m_1^*(\varepsilon)V_{s1}(\varepsilon)E_{s2}(\varepsilon)p_2 + m_2^*(\varepsilon)V_{s2}(\varepsilon)E_{s1}(\varepsilon)p_1)}{m_1^*(\varepsilon)V_{s1}(\varepsilon)m_2^*(\varepsilon)V_{s2}(\varepsilon)} \right) \quad (2-20)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = q(E \cdot V - (E_{S1}(\varepsilon)p_1 + E_{S2}(\varepsilon)p_2) \cdot V_S(\varepsilon)) \quad (2-21)$$

$$V_S(\varepsilon) \equiv \frac{m_1^*(\varepsilon)V_{S1}(\varepsilon)m_2^*(\varepsilon)V_{S2}(\varepsilon)}{(m_1^*(\varepsilon)p_1 + m_2^*(\varepsilon)p_2)(m_1^*(\varepsilon)V_{S1}(\varepsilon)p_2 + m_2^*(\varepsilon)V_{S2}(\varepsilon)p_1)} \quad (2-22)$$

$$m^*(\varepsilon) = m_1^*(\varepsilon)p_1 + m_2^*(\varepsilon)p_2 \quad (2-23)$$

В выражениях (2-20)÷(2-23): $V_{Sj}(\varepsilon)$, $E_{Sj}(\varepsilon)$ – статические зависимости дрейфовой скорости электронов и напряженности продольного электрического поля от энергии $\varepsilon = \varepsilon(E)$. Эти зависимости извлекаются из результатов расчетов методом Монте-Карло [143] стационарных полевых зависимостей дрейфовой скорости $V_{Sj}(E)$ и кинетической энергии $\varepsilon_{Sj}(E)$ для материалов каждого слоя структуры с индексом «j». $V_S(\varepsilon)$ – статическая величина дрейфовой скорости электронов во всей структуре. Модель легко обобщается на произвольное число разных слоёв (в расчётах использовалось три типа слоев: слой узкозонного канала, донорный широкозонный слой и слой нелегированного широкозонного спейсера).

Из-за отсутствия надежных данных, использовался упрощенный вариант задания параметров структур. При малом ($x \leq 0.2$) содержании In, слой $In_xGa_{1-x}As$ канала характеризовался параметрами объёмного нелегированного GaAs. Слои, обрамляющие канал, описывались параметрами слоя $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ с величинами перепада дна зоны проводимости на гетеропереходах равными 0,3 и 0,5 эВ - соответственно для слоев $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ и $In_{0,2}Al_{0,8}As$.

При продольном дрейфе по каналу во внешнем поле энергия электронов под затвором транзистора возрастает, также под затвором возрастает и поперечная разность потенциалов между затвором и каналом, что приводит к обеднению канала электронами, усиливающемуся в направлении стока. Для корректного учёта совокупности этих эффектов необходимо построение более точной модели - модели полевого транзистора, однако для оценки динамики изменения дрейфовой скорости в различных типах структур и их перспективности использования в транзисторах, достаточно учесть только первый эффект (увеличение энергии

электронов). При этом эффект обеднения канала не учитывается, привязка к конкретной конструкции затвора и транзистора не требуется. Для описания динамики электронов при задаваемой во времени зависимости напряженности внешнего электрического поля $E(t)$, все уравнения модели решаются самосогласованно.

При расчетах задавалось, что в течение 0.2 пс электроны движутся постоянном внешнем поле с напряжённостью 1 кВ/см. Затем на это поле накладывается импульс с амплитудой 20 кВ/см длительностью 1 пс. Далее дрейф электронов снова происходит во внешнем электрическом поле напряженностью 1 кВ/см. Предварительные расчеты показали, что качественный вид формы зависимости $V_{dr}(t)$ сохраняется для всех типов рассмотренных структур при других сравнимых по величине амплитудах поля.

Далее будут представлены результаты численного расчёта $V(t)$ - отклика дрейфовой скорости и вероятности нахождения электронов в широкозонном слое (как в сильнолегированном слое, так и в слое спейсера) на изменяемую во времени напряженность продольного внешнего электрического поля. Построенная модель не учитывает эффекты, связанные с изменением интенсивности рассеяния за счет отличия огибающих волновых функций электронов $\Psi_i(x)$ от плоских волн (т.е не учитывается соответствующее этому отличию возрастание роли размерного квантования) и т.д. Соответственно, в использованном приближении наилучшую динамику электронов (максимальную величину всплеска дрейфовой скорости) при расчетах будут демонстрировать электроны, находящиеся в узкозонном слое канала.

2.4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВСПЛЕСКА ДРЕЙФОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУРАХ

2.4.1. ДРЕЙФОВАЯ СКОРОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В DA-рНЕМТ ТРАНЗИСТОРАХ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Перспективы освоения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн полевыми транзисторами связывают в основном с использованием гетероструктур с квантовыми ямами на основе узкозонных материалов с высокой подвижностью электронов [59,60,134]. Применение сверхкоротких затворов и малая ширина запрещённой зоны приводят к низким пробивным напряжениям таких приборов, что создает проблемы в случае необходимости обеспечения больших величин выходных СВЧ мощностей. Кроме того, из-за малой эффективной массы электронов в таких структурах, поверхностная плотность электронов, при которой по сути дела электроны начинают покидать КЯ канала, ограничена. Однако, кроме использования традиционных рНЕМТ и mНЕМТ гетероструктур с селективным легированием, для улучшения СВЧ характеристик в настоящее время очень перспективным выглядит введение в такие типы приборов потенциальных барьеров, усиливающих локализацию горячих электронов в канале. С момента появления первых работ по DA-DpНЕМТ [149,150], продвижение в более высокочастотный диапазон приводит к постановке принципиального вопроса: как изменение формы и глубины КЯ структуры сказывается на быстродействии транзистора, связанного с сопутствующим изменением дрейфовой скорости электронов под затвором транзистора. Ранее основное внимание уделялось эффекту увеличения максимальной выходной СВЧ мощности при переходе к DA-DpНЕМТ варианту конструкции транзистора. В условиях отдачи максимальной выходной мощности, коэффициент усиления зависит как от дрейфовой скорости электронов под затвором, вообще говоря, усредненной по периоду колебания СВЧ сигнала, так и от многих других факторов (пробивного напряжения, режима работы, особенностей согласования и т.д.). Так что делать какие-либо выводы по этим

исследованиям о конкретных величинах дрейфовой скорости электронов в транзисторе было достаточно сложно. Можно было только предположить, что она существенно растёт [188]. Далее приведены простые оценки, позволяющие для ряда исследованных приборов по крайней мере оценить этот рост [151,202].

Известно, что в полевых транзисторах максимальная частота усиления по току f_t и соответственно их усилительные свойства непосредственно зависят от средней (по длине затвора) дрейфовой скорости электронов под затвором, т.е. $f_t \approx v_{dr}/L_g$. Здесь L_g – эффективная длина затвора с учётом краевых эффектов (точнее, это длина управляемой части канала с учетом областей управления его проводимостью под затвором и под его краями), v_{dr} – средняя дрейфовая скорость электронов под затвором [203,204]. Непосредственно измерить по отдельности эффективную длину затвора и среднюю дрейфовую скорость электронов крайне проблематично. Для реальных приборов, с развитой периферией и существенным влиянием паразитных элементов на выходные характеристики, точно измерить максимальную частоту усиления по току также весьма сложно. В большинстве случаев эта частота определяется по результатам измерений S-параметров, с последующим расчётом коэффициента усиления. По крайней мере, таким способом можно сделать достаточно точные оценки, особенно если учесть, что при обычных условиях согласования зависимость коэффициента усиления от величины « f_t » близка к квадратичной [205]. Кроме того, метод S-параметров позволяет оценить перспективность использования гетероструктур в миллиметровом диапазоне длин волн. Для анализа малосигнальных характеристик и возможности работы в миллиметровом диапазоне длин волн, исследовались мощные серийные транзисторы [97,206-208] с шириной Г-образного затвора 0,4; 0,8 мм и длиной 0,3 мкм и транзисторы с шириной трапецевидного затвора 1,2 мм и длиной 0,4 – 0,5 мкм. Так как ширина затвора транзисторов составляла более 0,4 мм, измерения их S-параметров проводились в специальном контактном устройстве в диапазоне частот 0,5 – 18,5 ГГц. Из-за погрешности измерений при непосредственном расчёте малосигнальных СВЧ

характеристик в ряде случаев возникали биения с достаточно большой амплитудой. Поэтому для более корректных оценок как максимального коэффициента усиления в этом диапазоне, так и для аппроксимации результатов на более высокие частоты, были определены параметры стандартной малосигнальной эквивалентной схемы транзисторов, с дальнейшими расчетами по ней. Далее с помощью эквивалентной схемы расчетным методом вычислялся максимально возможный коэффициент усиления G_{max} при двухстороннем согласовании, формула для расчета которого имеет вид:

$$G_{max} = \left| \frac{S_{21}}{S_{12}} \right| \cdot \left(K - (K^2 - 1)^{0.5} \right) \quad (2-24)$$

где K – коэффициент устойчивости транзистора.

На рисунке 2-14 приведено сравнение G_{max} для мощных полевых транзисторов с шириной затвора 0,8 мм на основе DpHEMT гетероструктуры и на основе DA-DpHEMT гетероструктуры. Видно, что транзисторы на гетероструктуре с донорно-акцепторным легированием имеют коэффициент усиления на 3 – 4 дБ больше и, соответственно, могут работать на более высоких частотах. Так, частота, на которой максимально возможный коэффициент усиления становится равен 0, у них на 40 % больше. Для проверки расчетов, на частоте 15 ГГц проводилось непосредственное измерение максимального малосигнального коэффициента усиления с использованием согласующих трансформаторов. Его величина составила около 16 дБ, что неплохо согласуется с расчетными данными.

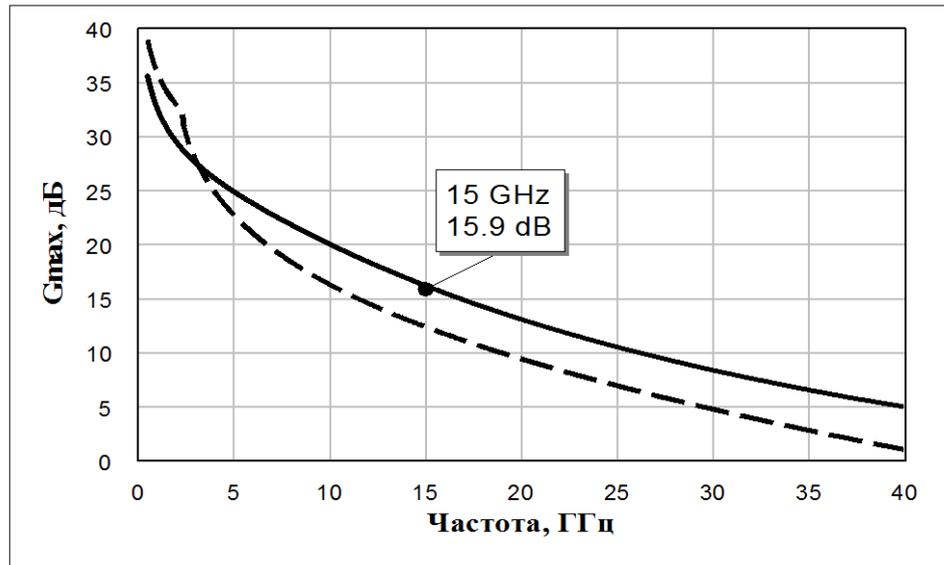


Рис. 2-14. Зависимость максимально возможного коэффициента усиления от частоты.

Результаты, представленные на рисунке 2-14, получены при согласовании входа и выхода полевых транзисторов с шириной затвора 0,8 мм на DpHEMT гетероструктуре (штриховая линия) и на DA-DpHEMT гетероструктуре (сплошная линия). Точкой отмечен результат измерения G_{max} для DA-DpHEMT транзистора при частоте 15 ГГц. Результаты измерений на частоте 10 ГГц СВЧ параметров приведены в таблице 14. Максимальный коэффициент усиления G_{max} был рассчитан для транзисторов с различной периферией. На рисунке 2-15 приведено сравнение величин G_{max} для транзисторов с шириной затвора 0,4, 0,8 и 1,2 мм.

Как и ожидалось, что при уменьшении ширины затвора, его длины и сопротивления, высокочастотные свойства прибора заметно улучшаются. Частота, при которой G_{max} обращается в ноль, растёт более чем в полтора раза.

Использование малосигнальных эквивалентных схем при расчете обосновано как в диапазоне частот, где были непосредственно измерены S-параметры транзисторов, так и не слишком далеко за границами диапазона измерений. Очевидно, что за границами диапазона частот, использованного при измерениях, данный расчет представляет собой только грубую оценку, аналогичную оценке падения коэффициента усиления на 6 дБ при росте рабочей частоты вдвое. Также надо учитывать, что данные результаты получены для

мощных транзисторов в серийном исполнении при ширине затвора более 0,4 мм и при длине одиночной секции затвора, равной 50 мкм, спроектированных и изготовленных для применения только в X- и Ku-диапазонах.

Таблица 14. Максимальная выходная СВЧ мощность и коэффициент усиления по мощности в DA-DpHEMT транзисторах с шириной затвора 1,2 мм.

№ партии	μ , $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$n_s \cdot 10^{-12}$, см^{-2}	P_{in} , мВт	P_{out} , мВт	K_P , дБ	I_d , мА	U_d , В	P_{out}/L_g , Вт/мм
1	4930	4,14	200	1500	8,8	300	10	1,25
2	4930	4,14	200	1400	8,5	250	10	1,17
3	5400	3,9	200	1830	9,6	320	11	1,53
4	5280	4,0	200	1700	9,3	300	11	1,42
5	5390	3,97	200	1860	9,7	320	11	1,55

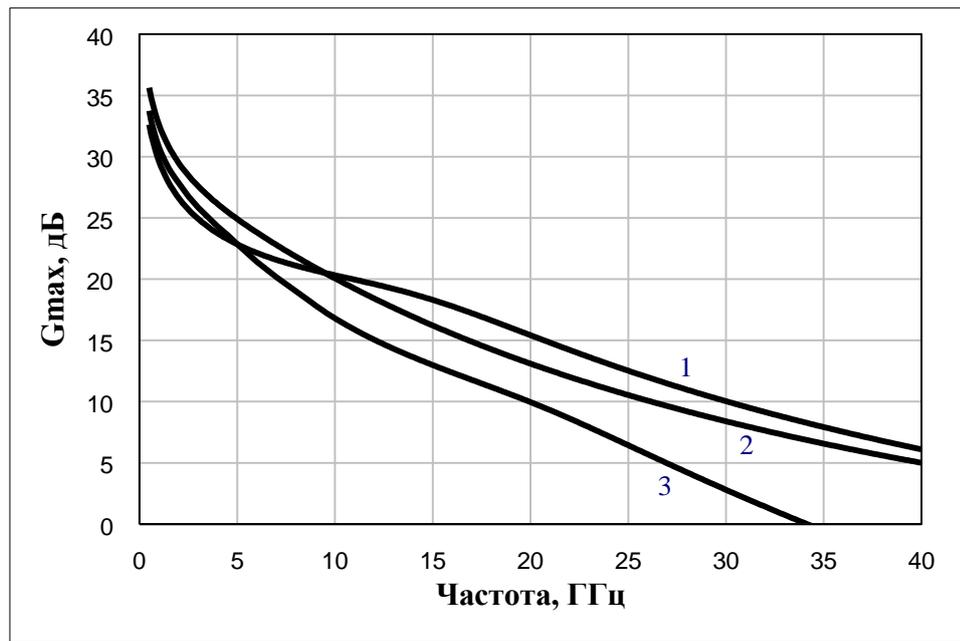


Рис. 2-15. Зависимость от частоты максимально возможного коэффициента усиления DA-DpHEMT транзисторов с различной периферией: 1 – ширина затвора 0,4 мм, 2 – ширина затвора 0,8 мм, 3 – ширина затвора 1,2 мм.

Первые результаты измерения СВЧ характеристик DA-DpHEMT транзисторов проводились на образцах транзисторов с шириной затвора 0,8 мм.

Результаты измерения на частоте 10 ГГц максимальной выходной СВЧ мощности P_{out} и коэффициента усиления по мощности K_P (при задании соответствующих оптимальных напряжения на стоке U_d и тока стока I_d в рабочей точке при «А» режиме усиления) для нескольких партий транзисторов с шириной затвора 1,2 мм при различной холловской подвижности и поверхностной плотности электронов, приведены в таблице 14.

На первый взгляд выходная мощность транзисторов сильно зависит от подвижности и чуть меньше от поверхностной плотности электронов в гетероструктуре, однако механизм столь сильного влияния пока неясен. Скорее всего, столь значительная разница в уровне выходной мощности связана не непосредственно с подвижностью и поверхностной плотностью электронов, а с технологическими нюансами изготовления гетероструктур и приборов.

В DA-DpHEMT транзисторах использовались гетероструктуры с подвижностью $\mu \approx 5400 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и с поверхностной плотностью электронов $n_s \approx 4 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}$, вычисленными по результатам измерения эффекта Холла.

Для сравнения: в традиционных DpHEMT транзисторах, применялись гетероструктуры с холловскими подвижностью $\mu \approx 6000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и поверхностной плотностью электронов $n_s \approx 3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}$.

Даже при худших сопротивлениях омических контактов [149,150,204] малосигнальный коэффициент усиления в DA-DpHEMT транзисторах на 3 – 4 дБ (в 2 – 2,5 раза) выше, чем у DpHEMT транзисторов. Малосигнальный коэффициент усиления пропорционален квадрату максимальной частоты усиления по току. В то же время максимальная частота усиления по току пропорциональна средней дрейфовой скорости электронов под затвором. Откуда автоматически следует что, несмотря на более низкую слабополевую холловскую подвижность электронов, средняя дрейфовая скорость электронов под затвором в DA-DpHEMT транзисторах заметно (в 1,4 – 1,6 раза) выше. Из-за более низкой слабополевой подвижности в DA-DpHEMT структурах, очевидно, что выявленный выигрыш в дрейфовой скорости является следствием увеличения

дрейфовой скорости именно горячих электронов. Естественно, что под затвором с длиной около 0,3 мкм и при таком увеличении дрейфовой скорости горячих электронов, их дрейф будет существенно не локализован – будет наблюдаться ярко выраженный всплеск дрейфовой скорости горячих электронов [204]. Для того чтобы средняя дрейфовая скорость горячих электронов под затвором была выше, заметно сильнее должен быть и их нелокальный разогрев. В разделе 2.2. говорилось о двух механизмах [187], которые могут отвечать за столь существенное увеличение дрейфовой скорости – сильное уменьшение поперечного пространственного переноса горячих электронов из слоя канала гетероструктуры и рост дрейфовой скорости электронов за счет вклада сильного размерного квантования электронов в ослабление рассеяния горячих электронов в слое канала.

Первый механизм является следствием усиления локализации горячих электронов в слое канала DA-DpHEMT структур с глубокой КЯ. Следствием этого является ослабление взаимодействия горячих электронов с рассеивающим потенциалом примесей и ослабление вероятности нахождения электронов в слоях с малой подвижностью. Грубые оценки показывают, что возможности увеличения дрейфовой скорости за счет уменьшения поперечного пространственного переноса и усиления локализации горячих электронов в канале достаточно ограничены – очевиден выигрыш в дрейфовой скорости лишь на 20 – 30% [187], но эта оценка требует уточнения.

Второй механизм связан с сильным размерным квантованием в DA-DpHEMT гетероструктурах. В типичной глубокой КЯ (с глубиной ≈ 0.8 эВ) DA-DpHEMT структур образуется всего лишь 10-15 размерно-квантовых подзон с расстоянием между ними более 50 мэВ, (что существенно больше величины энергии оптического фонона в InGaAs канале, примерно равной 35 мэВ). Естественно, что в такой КЯ при ее достаточно малой ширине оказываются разрешенными к существованию всего лишь 10-15 величин собственных значений полной энергии, что в свою очередь, сильно уменьшает количество состояний в пространстве импульсов, в которые могут быть рассеяны электроны,

оставаясь внутри КЯ. Исходя из приведенных результатов измерений, усиление размерного квантования в DA-DpHEMT структурах дает свой вклад в увеличение дрейфовой скорости горячих электронов под затвором не меньше, чем эффект от ослабления поперечного пространственного переноса.

2.4.2. ВСПЛЕСК ДРЕЙФОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С ДОНОРНО - АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Результаты расчётов

На рисунке 2-16 приведены рассчитанные с помощью выражений (2-14)÷(2-23) зависимости от времени всплеска дрейфовой скорости в типичных нелегированных материалах, используемых в составе гетероструктур.

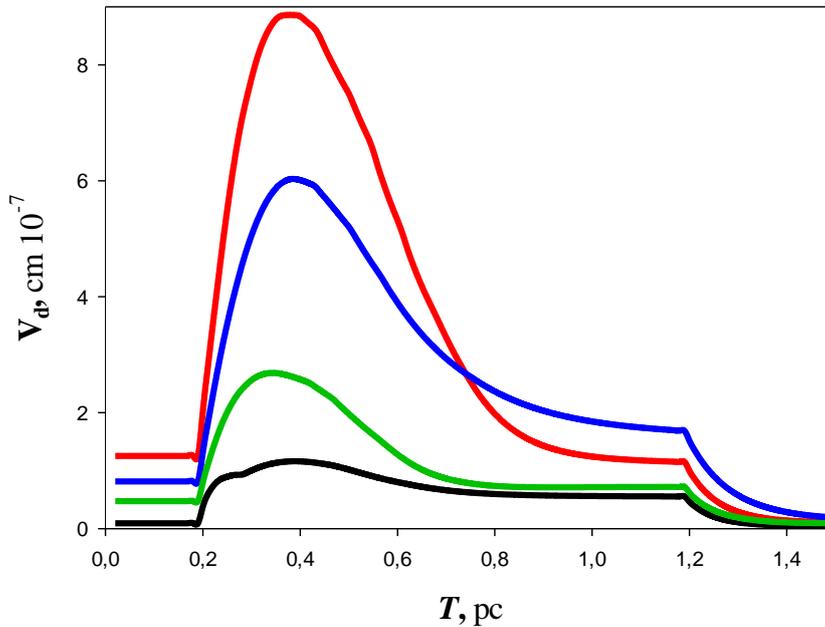


Рис. 2-16. Зависимость всплеска дрейфовой скорости от времени в типичных материалах слоев, используемых в составе DA-DpHEMT структур. В слое $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ - красная кривая, в слое $GaAs$ - синяя кривая, в слое $In_{0,52}Al_{0,48}As$ - зеленая кривая, в легированном донорами слое $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ - черная кривая.

На рисунке 2-16 обращает на себя внимание очень сильное уменьшение амплитуды всплеска дрейфовой скорости в $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ по отношению к амплитуде всплеска дрейфовой скорости в $GaAs$ - типичных материалах слоев DpHEMT структур. Становится очевидной полезность минимизации вероятности нахождения электронов в легированных донорами слоях $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$.

Ниже на рисунке 2-17 приведены зависимости всплеска дрейфовой скорости от времени не просто в материалах разных составов, а в слое $GaAs$,

окруженном слоями $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, что характерно для транзисторных DpHEMT структур с GaAs каналом.

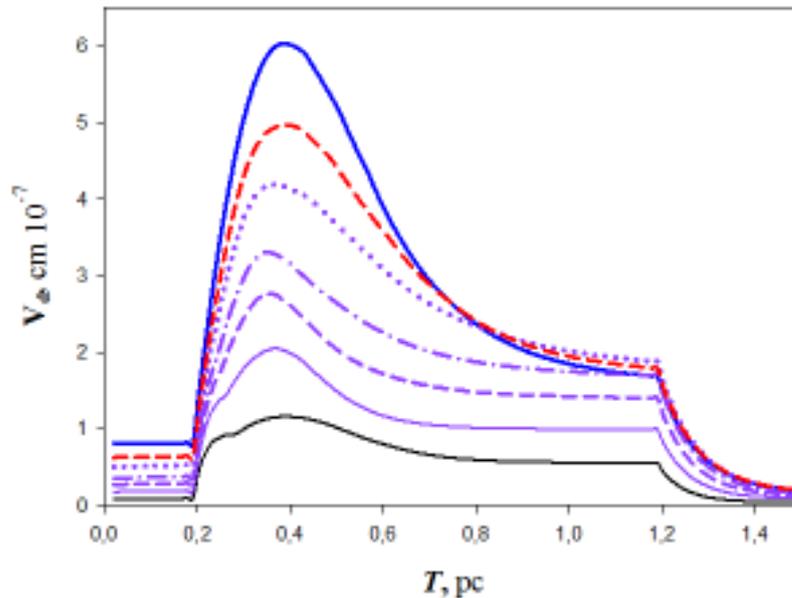


Рис. 2-17. Зависимость смещения вниз всплеска дрейфовой скорости во времени в слое GaAs, окруженном слоями $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ при величинах вероятности нахождения электронов в слое GaAs: 0,95, 0,9, 0,8, 0,7, 0,5. Для сравнения приведены зависимости всплеска дрейфовой скорости от времени для нелегированных объемных образцов GaAs (синяя кривая) и $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (черная кривая).

На рисунке 2-17 обращает на себя внимание тот факт, что даже при очень незначительной вероятности нахождения электронов в слое в $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, амплитуда всплеска заметно падает по отношению к амплитуде в GaAs.

В частности, даже при 10 % вероятности нахождения электронов за пределами слоя GaAs (т.е. при 10 % вероятности нахождения электронов в слое $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$), амплитуда всплеска падает в 1,5 раза.

Введение в DA-DpHEMT транзисторную структуру *pin*-барьеров, усиливающих локализацию горячих электронов в слое канала, приводит к уменьшению вероятности нахождения электронов в слое $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, поэтому

важно показать в сравнении, как введение локализирующих барьеров сказывается на амплитуде и ширине всплеска дрейфовой скорости.

На рисунке 2-18 для трех типов DpHEMT структур (смотри рисунок 2-12) и для DA-DpHEMT структуры приведены рассчитанные зависимости всплеска дрейфовой скорости электронов от времени.

Задавались следующие параметры упрощенных моделей структур.

Расстояние от затвора до канала задавалось равным 350 \AA , толщины спейсеров задавались равными 20 \AA , ширина дна квантовой ямы в двойных структурах с двусторонним легированием задавалось равной 170 \AA .

При расчётах материал слоя канала задавался как слой GaAs без примеси индия. На практике для улучшения характеристик прибора в слое канала обычно используют не GaAs, а $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с мольной долей индия $x \approx 0.1 \div 0.15$, однако, как отмечалось выше, учёт разницы транспортных свойств электронов в GaAs и $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с такой низкой мольной долей в рамках используемой модели выходит за рамки точности. Двойные структуры предполагались δ - легированными с поверхностной концентрацией доноров $n_s = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ в каждом δ - слое.

В DA-DpHEMT структурах задавался вариант структур с одинаковыми уровнями легирования донорами и акцепторами выше и ниже слоя канала. Задавалась поверхностная плотность акцепторов $p_s = 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (при варианте с δ - легированием акцепторами), поверхностная плотность доноров задавалась равной $n_s = 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ в каждом донорном δ - слое чтобы сохранить такую же избыточность легирования донорами, как и в DpHEMT варианте, равную $n_s = 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Расстояние между δ - слоями доноров и акцепторов составляло 50 \AA .

Для задаваемых амплитуд внешнего электрического поля результаты расчётов при расстоянии между дельта - слоями доноров и акцепторов 50 и 100 \AA отличались незначительно из – за малости соответствующих энергий электронов. Также незначительно для DA-DpHEMT структур изменялись результаты и при изменении избыточности легирования донорами в диапазоне $n_s = (2 \div 6) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

По-видимому, это связано с тем, что в части детализации распределения примеси рассеяние на потенциале доноров описывается достаточно грубо.

Целью анализа всплеска дрейфовой скорости является прогнозирование перспективности различных вариантов конструкции транзисторных гетероструктур и изучение полуколичественных закономерностей, поэтому, такие технологические особенности, как учет дефектов структуры и усиление диффузионно-ростовой миграции доноров из GaAs матриц (рисунок 2-9) в процессе роста структур при увеличении поверхностных плотностей примеси не учитываются.

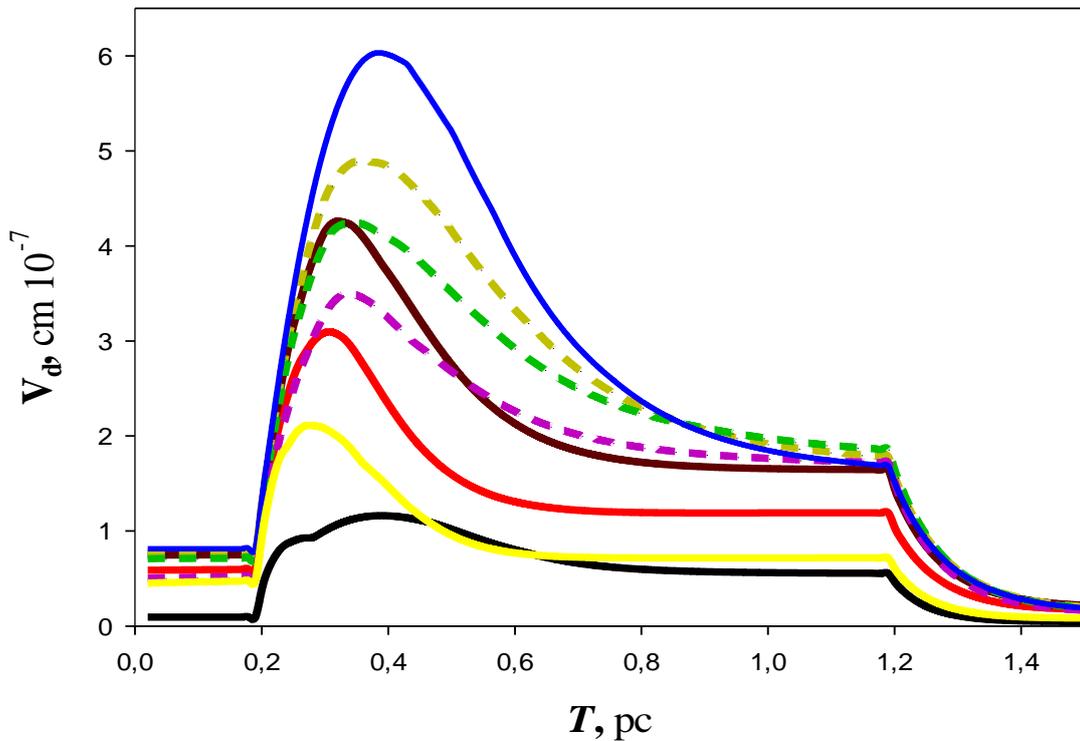


Рис. 2-18. Рассчитанные зависимости всплеска дрейфовой скорости электронов от времени для прямой (штриховые кривые), обращенной (желтая кривая), для ДрНЕМТ (красная кривая) и для DA-ДрНЕМТ (коричневая кривая) структур.

На рисунке 2-18 для прямой структуры приведены зависимости всплеска дрейфовой скорости от времени при напряжениях на затворе: $U_g = 0,5$ В - сиреневая штрих-линия, $U_g = 0$ В - зеленая штрих-линия, $U_g = -0,5$ В - желто-серая штрих-линия. Для сравнения приведен всплеск дрейфовой скорости в

нелегированном GaAs (синяя кривая) и в легированном $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (черная кривая). На рисунке 2-18 хорошо видно преимущество DA-DpHEMT структур над DpHEMT структурами по амплитуде всплеска $V_{dr}(t)$ во всем расчетном диапазоне.

Из рисунка 2-18 следует, что минимальный как по амплитуде, так и по длительности всплеск $V_{dr}(t)$ наблюдается в обращенной гетероструктуре. Это результат того, что в обращенной структуре около 70% электронов, разогреваясь в продольном электрическом поле, переходят из канала в слой $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$.

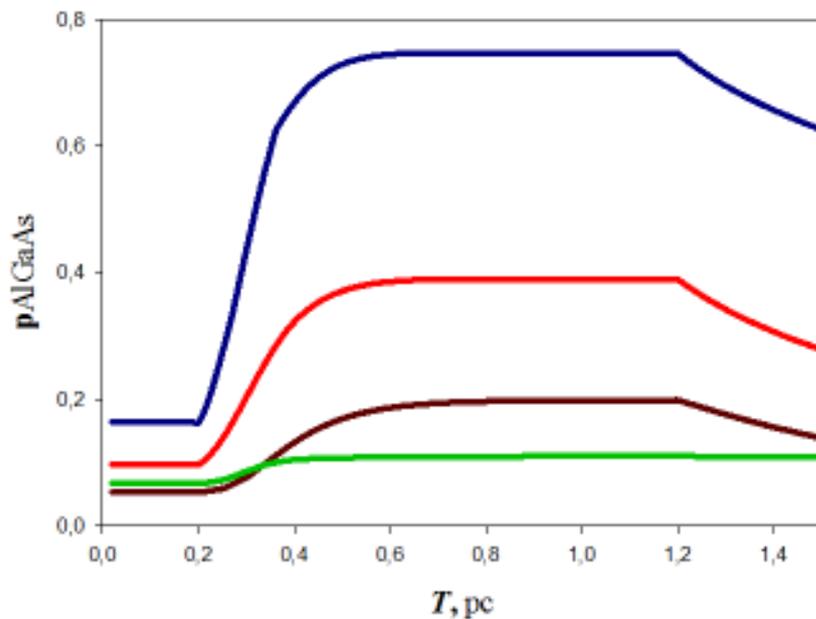


Рис. 2-19. Вероятность нахождения электронов в слое $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ обращенной структуры (синяя кривая), прямой структуры (красная кривая), DA-DpHEMT структуры (коричневая кривая), DA-pHEMT прямой структуры (зеленая кривая) с $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ каналом.

На рисунке 2-18 видно существенное отличие между обращенной структурой и прямой pHEMT структурой по виду зависимости $V_{dr}(t)$. При внешней схожести ситуаций (и там и там электроны почти свободно уходят в сторону подложки) по величине всплеска обращенная гетероструктура металл – $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ – $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ оказывается намного хуже, чем прямая pHEMT структура. По сути дела, из-за сильного поперечного пространственного

переноса, по величине $V_{dr}(t)$ обращенная структура «металл – $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ – $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ » выглядит непривлекательно, она занимает промежуточное положение между DrHEMT – структурой и объёмным $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Такое поведение обращенной структуры можно объяснить сужением ее квантовой ямы с сопутствующим подъёмом размерно-квантовых уровней при увеличении обратного смещения на затворе. Это сужение вызывает интенсивный переход электронов из канала в направлении подложки - в слой $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. При подаче на затвор обратного смещения происходит сужение квантовой ямы, вызванное увеличением напряженности результирующего электрического поля, прижимающего электроны к нижней гетерогранице слоя канала. При этом на ней происходит сложение абсолютных величин напряженностей электрического поля доноров и электрического поля обратного смещения.

Расчеты показали (смотри рисунок 2-18) заметно больший (по сравнению с обращенной структурой) всплеск $V_{dr}(t)$ у прямой pHEMT структуры с верхним обогащением слоя канала электронами. У прямой pHEMT структуры всплеск возрастает при увеличении обратного смещения на затворе. В других типах структур зависимость величины и формы всплеска от напряжения на затворе существенно меньше. Это вполне объяснимо, так как в прямой pHEMT структуре с ростом обратного смещения на затворе квантовая яма канала (практически треугольная вблизи верхней гетерограницы слоя канала) расширяется, ее размерно-квантовые уровни опускаются, а это усиливает локализацию горячих электронов в слое канала. Поэтому вероятность нахождения электронов в слое $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ оказывается очень низкой – заметно ниже, чем в других структурах. Отметим, что это расширение квантовой ямы вызвано уменьшением напряженности результирующего электрического поля, прижимающего электроны к верхней гетерогранице слоя канала при подаче на затвор обратного смещения. На верхней гетерогранице из величины напряженности поля доноров вычитается величина напряженности внешнего поля обратного смещения.

Расчеты продемонстрировали (смотри рисунок 2-18), что формирование с помощью донорно – акцепторного легирования локализирующих барьеров существенно увеличивает как величину, так и длительность всплеска дрейфовой скорости электронов за счёт усиления локализации электронов в канале. Этот эффект согласуется с вероятностью нахождения электронов в широкозонных слоях (рисунок 2-19).

В работе [209] вместо двойной структуры вида $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As} - \text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As} - \text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ исследовался иной тип НЕМТ структур. В этом типе структур использовались гетеропереходы $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, где $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ - слой канала.

Расчеты показывают, что в структуре вида « $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ канал – $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ » всплеск дрейфовой скорости оказывается гораздо больше, чем в обычной DpHEMT структуре вида « $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As} - \text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ канал- $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ ». Этот результат напрямую связан с большей величиной перепада дна зоны проводимости Δ на границе гетероперехода $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (0.5 эВ вместо 0.3 эВ). Эффективная высота барьеров в КЯ канала (отсчитываемая от уровня Ферми в канале до положения дна зоны проводимости в слое $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$) за счет этого возрастает почти втрое. Однако, для сильной локализации горячих электронов в слое $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ канала такого увеличения эффективной высоты барьера оказывается недостаточно. Это подтверждается результатами расчетов: длительность всплеска $V_{dr}(t)$ в структуре вида $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ канал – $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ вопреки ожиданиям оказывается даже меньше, чем в DA-DpHEMT структуре вида $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As} - \text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As} - \text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, (смотри рисунок 2-20, сравни непрерывную зеленую кривую и штриховую коричневую кривую).

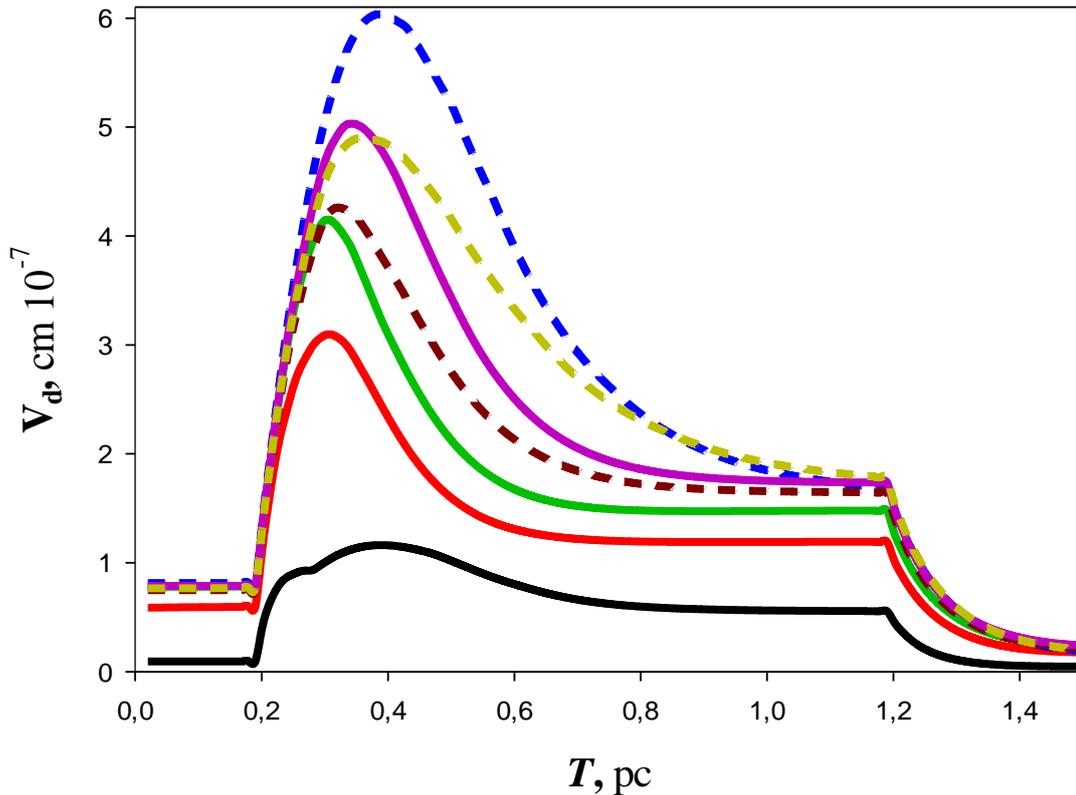


Рис. 2-20. Рассчитанные зависимости всплеска дрейфовой скорости электронов в двойных структурах.

На рисунке 2-20 представлены зависимости от времени дрейфовой скорости в следующих образцах. Для DpHEMT (красная кривая) и для DA-DpHEMT (штриховая коричневая кривая) структур, для DHEMT « $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ » (зеленая кривая), для DA-DHEMT « $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ » (сиреневая кривая). Для сравнения приведен всплеск дрейфовой скорости в нелегированном GaAs (синяя кривая), в легированном $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (черная кривая) и в прямой pHEMT структуре (желтая кривая).

Самой эффективной по величине $V_{dr}(t)$ среди уже проанализированных двойных структур оказывается DA-DpHEMT структура вида « $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ ». В этой структуре всплеск дрейфовой скорости по форме и амплитуде слабо отличается от всплеска дрейфовой скорости в прямой pHEMT структуре (она имеет практически треугольную КЯ канала вблизи верхней гетерограницы слоя канала). Этот результат соответствует близким вероятностям нахождения электронов в широкозонном материале (смотри рисунок 2-21).

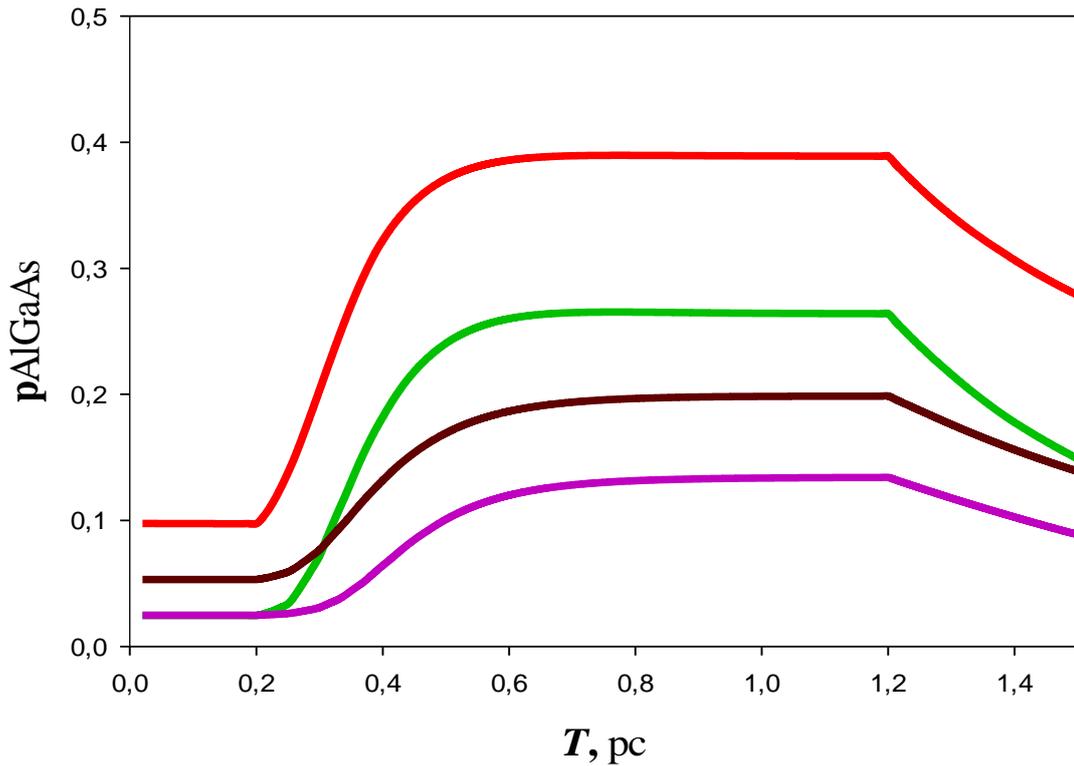


Рис. 2-21. Вероятность нахождения электронов в широкозонных слоях двойных структур.

На рисунке 2-21 представлены зависимости от времени вероятности нахождения электронов в следующих слоях. В слое $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ DpHEMT структуры (красная кривая), в слое $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ DHEMT структуры (зеленая кривая), в слое $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ DA-DpHEMT структуры (коричневая кривая), в слое $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ DA-DHEMT структуры (сиреневая кривая).

На рисунке 2-22 для ряда проанализированных по виду зависимостей $v_{dr}(t)$ структур приведены графики зависимостей статической дрейфовой скорости электронов от напряженности внешнего продольного электрического поля, вычисленные по формуле (2-22).

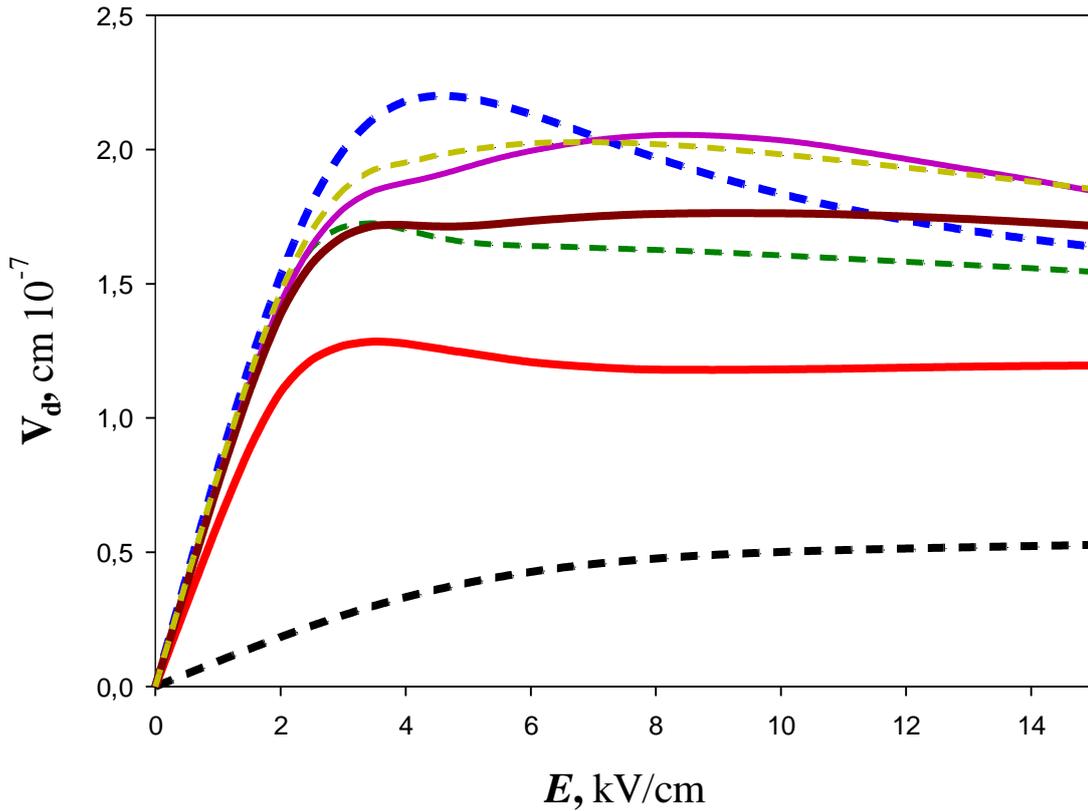


Рис. 2-22. Зависимости статической дрейфовой скорости электронов от напряженности внешнего продольного электрического поля.

На рисунке 2-22 представлены зависимости дрейфовой скорости в следующих образцах. Прямая рНЕМТ структура при $U_g=0$ В - красная кривая, DA-DpHEMT структура при $U_g=0$ В - коричневая кривая, Прямая рНЕМТ структура при $U_g=-0.5$ В - сиреневая кривая, DA-DHEMT структура при $U_g=0$ В - желтая кривая, DHEMT структура при $U_g=0$ В - зеленая кривая. Для сравнения приведены: аналогичные зависимости в донорном $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ (черная кривая) и в нелегированном GaAs (синяя кривая).

Сравнивая результаты расчетов, приведенные на рисунках 2-18, 2-20 и 2-22, видим, что как обычно в материалах со сходными характеристиками, наблюдается достаточно сильная корреляция между всплеском дрейфовой скорости электронов и её статической зависимостью от поля, однако численные различия могут быть достаточно существенны.

Следует отметить, что несмотря на простоту использованной модели, результаты расчётов сравнительного увеличения дрейфовой скорости в DA-рНЕМТ структурах неплохо коррелируют с данными непосредственных измерений [212], в которых отмечался рост дрейфовой скорости электронов на 20 – 30 %. В то же время, как неоднократно отмечалось [140-142], средняя скорость электронов под субмикронным затвором транзистора во многом определяется не только амплитудой всплеска, но и его длительностью, которая в DA-DpНЕМТ структурах с донорно - акцепторным легированием почти вдвое больше, чем в обычных донорных DpНЕМТ структурах с двухсторонним обогащением канала электронами. Поэтому оценка роста средней дрейфовой скорости электронов под затвором транзистора на DA-DpНЕМТ структурах по проведенным расчётам оказывается ближе к результатам работы [151] где увеличение средней дрейфовой скорости электронов оценивалось в 1,4 – 1,6 раза, что ещё раз демонстрирует важность анализа именно нелокального разогрева электронов для таких приборов.

Как отмечалось выше, по величине всплеска дрейфовой скорости обращённая гетероструктура металл – $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ – $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ показала себя намного хуже, чем соответствующая ей прямая рНЕМТ структура. В то же время, для обращенной структуры металл – $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ – $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ (смотри рисунок 2-23) картина несколько другая – благодаря большому перепаду дна зоны проводимости на границах слоя $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ канала, она становится близка к характеристикам прямой рНЕМТ структуры.

На рисунке 2-23 представлены зависимости от времени дрейфовой скорости в следующих образцах. Для рНЕМТ структур « $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ – $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ » при $U_g = -0.2$ В - сиреневая штрих-линия, для рНЕМТ структур « $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ – $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ » при $U_g = 0$ В - желтая линия, для НЕМТ структур « $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ – $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ » при $U_g = 0$ В - салатная штрих-линия, для DA-НЕМТ структур « $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ – $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ » при $U_g = -0.2$ В - зеленая штрих-линия, при $U_g = 0.5$ В красная штрих-линия. Для сравнения: приведен всплеск дрейфовой скорости в

нелегированном GaAs (синяя кривая), в легированном $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (черная кривая) и для DrHEMT структур (красная кривая).

Комментарий к результатам, приведенным на рисунке 2-23.

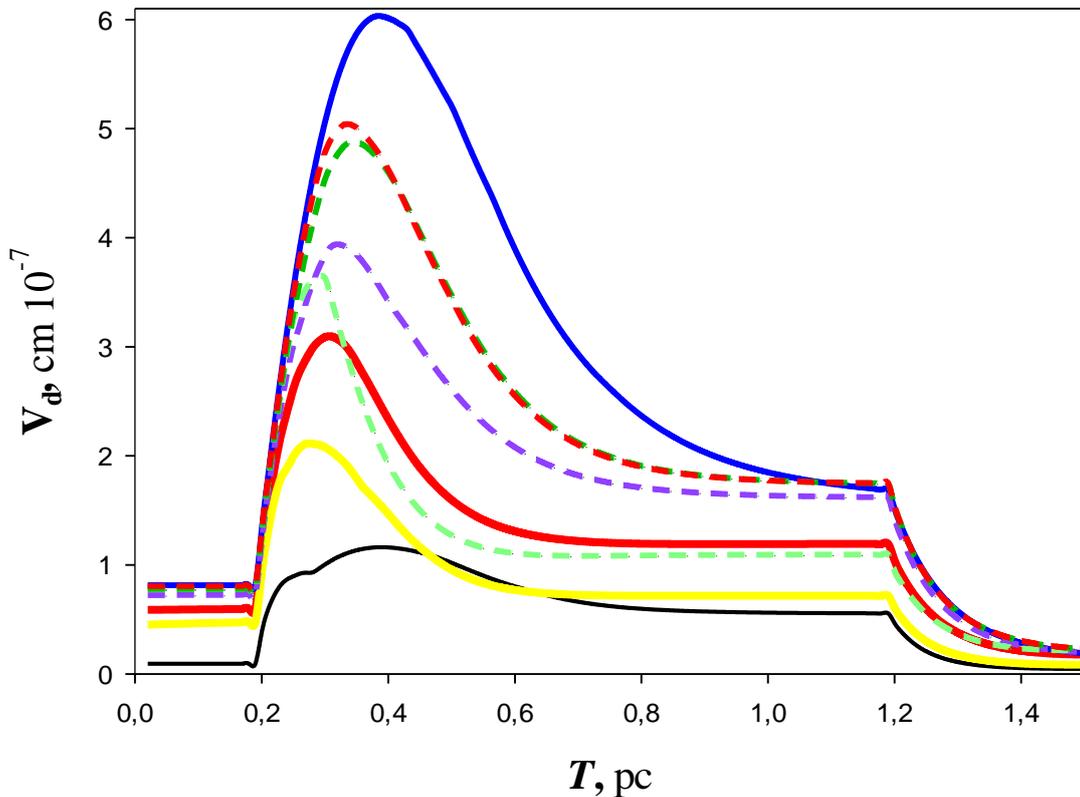


Рис. 2-23. Рассчитанные зависимости всплеска дрейфовой скорости электронов в обращенных структурах.

Из-за большего разрыва дна зоны проводимости на границах слоя канала, в обращенной структуре «металл – $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ – $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ » всплеск дрейфовой скорости электронов довольно велик, но происходит на временах меньших, чем в структуре с двусторонним легированием. Такое поведение зависимости $V_{dr}(t)$, скорее всего, как раз и связано с сужением квантовой ямы, дающим подъем собственных уровней в обращенной структуре и с сильным перераспределением электронов между каналом и широкозонным слоем при увеличении обратного смещения на затворе. В обращенной гетероструктуре с дополнительным локализирующим *pin* – потенциальным барьером со стороны подложки поперечный пространственный перенос в сторону подложки подавлен. В результате этого в

широкозонном слое $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ оказывается менее 30% электронов, а всплеск дрейфовой скорости оказывается близок по величине к всплеску дрейфовой скорости в DA-DpHEMT структуре с двусторонним легированием.

Еще эффективней оказывается введение *pin* – потенциального барьера со стороны подложки в обращенной структуре вида «металл – $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ – $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ ». В этом случае в широкозонный $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ переходит менее 15 % электронов, что хорошо видно из результатов, приведенных на рисунке 2-24, а величина всплеска оказывается практически такой же, как и в соответствующей структуре с двусторонним по отношению к слою канала DA-легированием.

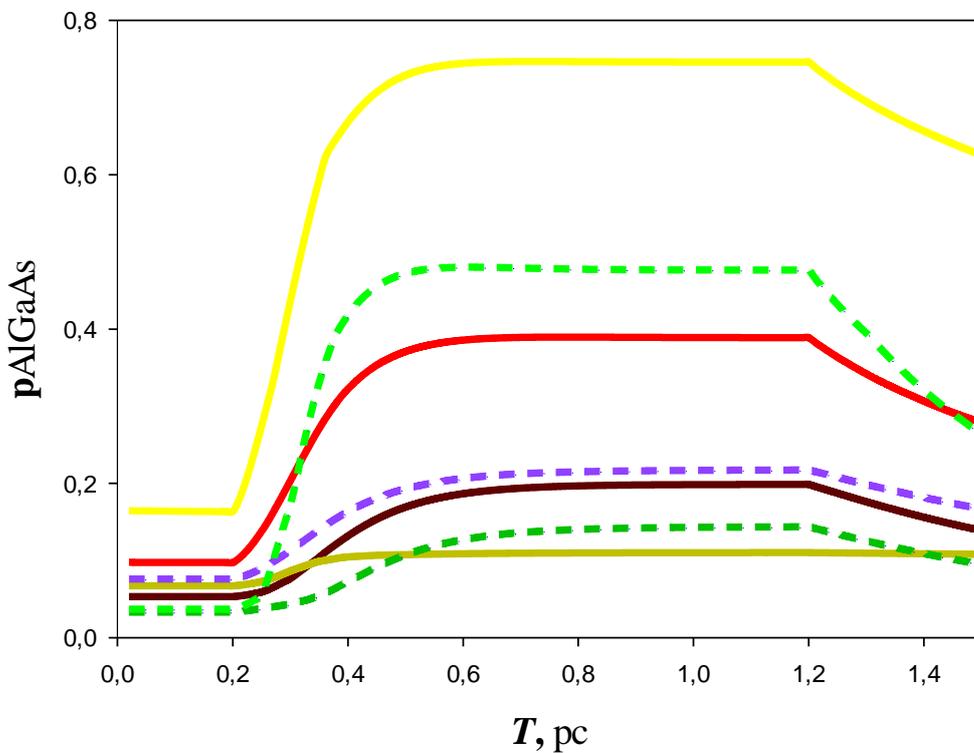


Рис. 2-24. Вероятность нахождения электронов в широкозонных слоях.

На рисунке 2-24 приведены следующие вероятности: в слое $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ прямой pHEMT структуры (красная кривая), в слое $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ обращенной DA-pHEMT структуры (сиреневая кривая), в слое $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ обращенной DHEMT структуры при $U_g = 0,3$ В (салатовая кривая), в слое $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ обращенной DA-DHEMT структуры при $U_g = -0,2$ В (зеленая кривая), в слое $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ DA-pHEMT структуры (коричневая кривая).

Таким образом, включение в обращённые гетероструктуры дополнительного *pin*-барьера ниже слоя канала и вставки широкозонного слоя AlAs между затвором и каналом, сохраняют такие полезные особенности, как увеличение крутизны за счет близости канала к затвору [188,211,212] и улучшение линейности передаточной характеристики при достаточно высоких напряжениях на затворе.

Для таких структур характерны следующие эффекты:

- сужение квантовой ямы при повышении обратного смещения на затворе,
- большая разность между величинами энергий дна соседних квантово - размерных подзон (в разы превышающая энергию оптического фонона),
- всплеск дрейфовой скорости электронов, близкий к величинам, характерным для прямых DA-pHEMT гетероструктур.

В принципе, это создаёт возможность впервые разработать такие полевые СВЧ транзисторы, на работу которых существенное влияние оказывает размерное квантование в квантовой яме гетероструктур.

Ранее в [187] отмечалось, что в части быстродействия, СВЧ характеристики DA-pHEMT транзисторов могут быть близки к характеристикам наиболее быстрых полевых транзисторов - полевых транзисторов на основе метаморфных (mHEMT) гетероструктур с подложками из фосфида индия. Этот вывод в определённой мере подтверждается результатами расчётов всплеска дрейфовой скорости, проведенными в рамках разработанной модели.

На рисунке 2-25 приведена зависимость дрейфовой скорости электронов от времени при включении ступенчатого сильного внешнего поля для DmHEMT структур с гетеропереходами $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ – $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ при двустороннем легировании слоев, расположенных выше и ниже обрамляющих $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ канал спейсеров.

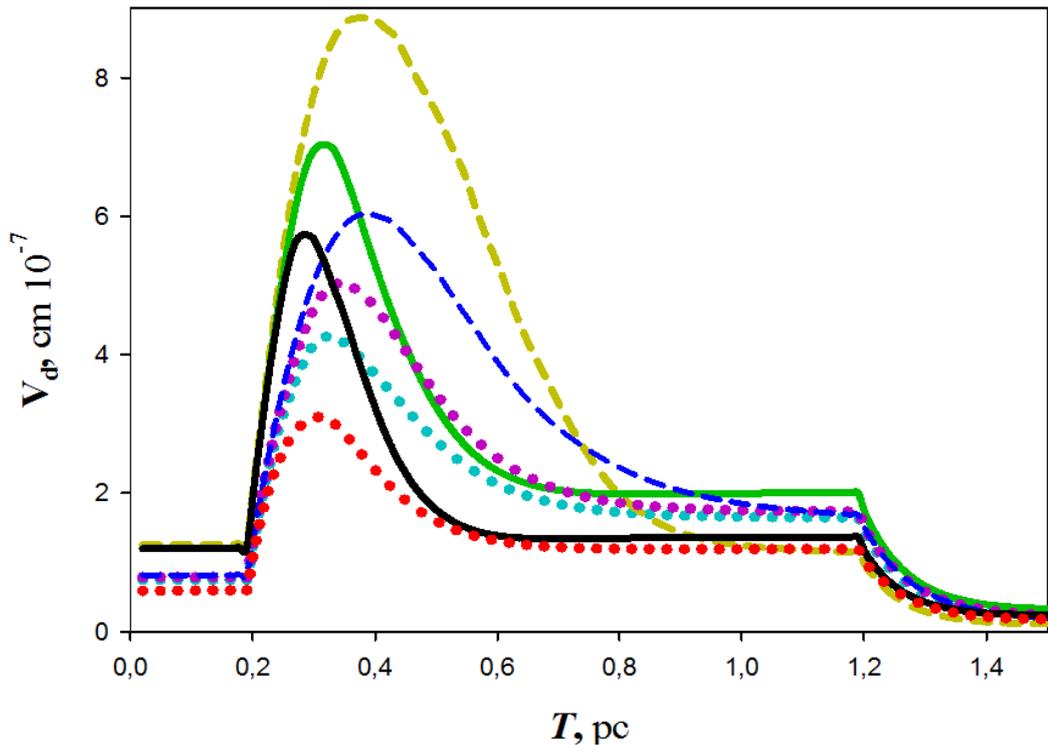


Рис. 2-25. Рассчитанные зависимости всплеска дрейфовой скорости электронов в метаморфных mHEMT-структурах.

На рисунке 2-25 представлены зависимости от времени дрейфовой скорости в следующих образцах. В объемном слое $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ – желто-серая штрих-линия; в DA-DmHEMT структурах вида « $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ - $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ – $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ » при $U_g = 0$ В - зеленая линия; в объемном слое GaAs – синяя штрих-линия; в DmHEMT структурах вида « $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ - $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ – $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ » при $U_g = 0$ В - черная линия; в DmHEMT структурах вида « $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ - $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ – $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ » при $U_g = 0$ В - сиреневая пунктир-линия; в DA-DpHEMT структурах вида « $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ - $\text{In}_{0.165}\text{Ga}_{0.835}\text{As}$ – $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ » при $U_g = 0$ В - салатовая пунктир-линия; в DpHEMT структурах вида « $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ - $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ – $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ » при $U_g = 0$ В - красная пунктир-линия.

Результаты, приведенные на рисунке 2-25, показывают, что из – за заметно отличающихся характеристик материала, использованного в составе слоя канала, всплеск дрейфовой скорости в mHEMT структурах с $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ каналом

заметно больше, чем в рНЕМТ структурах с $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ каналом, где существенно выше содержание GaAs.

При сравнении между собой двойных структур с селективным легированием на основе гетеропереходов « $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As} - \text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ » и « $\text{GaAs} - \text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ » видно, что средняя дрейфовая скорость в первой структуре будет почти в 2 раза выше, чем во второй структуре.

Важно, что всплеск дрейфовой скорости в DmНЕМТ структуре « $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As} - \text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As} - \text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ » при $U_g = 0$ В, хотя и почти в полтора раза больше по амплитуде, чем в структуре DA-DpНЕМТ транзистора при $U_g = 0$ В, но он слабее растянут во времени. Следовательно, можно ожидать, что усредненные по времени величины $\langle V_{dr}(t) \rangle_t$ под затвором приборов на основе таких структур будут отличаться не более чем на 20 %. С учётом того, что DA-DpНЕМТ транзисторы могут быть изготовлены при достаточно высоком содержании индия в слое канала, величины $\langle V_{dr}(t) \rangle_t$ могут оказаться практически одинаковыми. В приборах на основе DA – структур с гетеропереходами $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ величины $\langle V_{dr}(t) \rangle_t$ могут оказаться даже выше. В то же время (как и следовало ожидать, смотри рисунок 2-25) применение DA - легирования в DmНЕМТ структурах на основе гетеропереходов « $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As} - \text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ » должно приводить к росту $\langle V_{dr}(t) \rangle_t$ примерно в полтора раза по отношению к обычным DmНЕМТ структурам на основе гетеропереходов « $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As} - \text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ ».

2.5. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ДОНОРНО – АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Выбор и обеспечение оптимальных или предельно допустимых режимов работы микроэлектронных приборов представляет достаточно сложную проблему, требующую решения целого комплекса задач, начиная с теоретического исследования тепловых режимов полупроводниковых приборов с последующей оптимизацией известных конструкций и кончая разработкой теплоотводов на новых перспективных материалах. При этом возникает ряд вопросов, частичным ответам на которые посвящен следующий раздел.

2.5.1. Локализация домена сильного поля

При проектировании СВЧ МИС усилителей мощности и мощных полевых транзисторов для увеличения рабочих частот и улучшения характеристик приборов, особенно в изделиях специального назначения [213-216] часто требуется максимальная плотность упаковки прибора, которая ограничена максимально допустимыми размерами чипа и минимальными топологическими размерами с одной стороны и, с другой стороны, максимальной температурой канала, составляющей для структур на основе GaAs величину порядка 150° С, выше которой начинаются интенсивные деградиационные процессы. В этих условиях становится очень важной правильная оценка максимальной температуры канала транзистора. В свою очередь для расчета максимальной температуры канала и анализа тепловых режимов мощных полевых транзисторов существенное значение приобретает определение расположения и оценка размеров области наиболее интенсивного тепловыделения.

Для постановки задачи анализа тепловыделения вначале рассмотрим GaAs полевой транзистор с объемным легированием канала на основе гомоэпитаксиальной структуры (FET транзистор).

В рабочей точке транзистора при «А»-режиме усиления ток стока I_d составляет примерно 300 мА на одну секцию транзистора вида «исток-затвор-

сток» (SGD) при напряжении на стоке U_d , равном 7 В, что соответствует рассеиваемой в транзисторе энергии около 2 Вт. При дрейфе электронов в области сравнительно слабых полей («исток – затвор» и «затвор – сток») напряженность электрического поля имеет допороговые значения для GaAs (менее $E_s=4$ кВ/см), а с учетом того, что в рабочей точке ток стока транзистора составляет 0.5 от максимально возможного тока - менее 2 кВ/см, что даже при размерах расстояния между истоком и стоком $L_0 = 3$ мкм приводит к относительно слабому тепловыделению: $P \approx I_d \times L_{sd} \times E_s/2 = 0.18$ Вт.

Таким образом, оказывается, что в области дрейфа электронов в сравнительно слабых полях тепловыделение почти на порядок меньше полной рассеиваемой в транзисторе мощности. Очевидно, что основная энергия приобретается электронами под затвором в области домена сильного поля, размер и форма которого существенно зависят как от параметров гетероструктуры и топологии транзистора, так и от режима работы прибора. Здесь надо сразу уточнить одну важную особенность. Дело в том, что в области домена энергия приобретается электронами от внешнего электрического поля. Часть этой энергии рассеивается в области домена сильного поля, а часть выносится электронами за его пределы. По сути дела, именно область, где наблюдаются интенсивные процессы рассеяния энергии электронов (передача энергии кристаллической решетке), и является областью тепловыделения. В транзисторах с субмикронной длиной затвора из-за нелокального дрейфа электронов (наблюдаемого там, где дрейфовая скорость превышает максимальную статическую дрейфовую скорость) длина домена сильного поля может заметно отличаться как от длины области, где дрейфовая скорость электронов максимальна. Интенсивные процессы передачи энергии от электронов имеют место в области так называемого всплеска дрейфовой скорости и в области, где кинетическая энергия полевого дрейфа электронов заметно превышает ее величину в слабых полях.

Плотность источников тепла Q_s в сечении транзистора площадью S в простейшем гидродинамическом приближении [217,218] пропорциональна энергии рассеиваемой электронами в единицу времени:

$$Q_s = \frac{\partial W}{\partial t} = S n \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\tau_\varepsilon(\varepsilon)} = \frac{I \varepsilon - \varepsilon_0}{q v \tau_\varepsilon(\varepsilon)} \quad (2-25)$$

Окончательно, с учетом вида времен релаксации (2-9) и (2-10) получаем:

$$Q_s = \frac{\partial W}{\partial t} = I \frac{E_s(\varepsilon) v_s(\varepsilon)}{v} \quad (2-26)$$

Для расчета мощности тепловыделения в транзисторе на гетероструктурах с селективным легированием необходимо учитывать, что тепловыделение по-разному происходит в широкозонном и узкозонном слоях гетероперехода. Поэтому выражения для величины плотности мощности тепловыделения на единицу ширины затвора имеют следующий вид для узкозонного и для широкозонного слоев гетероперехода [219,220]. Ниже: $n_{s1,2}$ – поверхностные плотности электронов в узкозонном и широкозонном слоях гетероперехода.

$$Q_{s1} = \frac{\partial W_1}{\partial t} = q n_{s1} E_{s1}(\varepsilon_1) v_{s1}(\varepsilon_1) \quad (2-27)$$

$$Q_{s2} = \frac{\partial W_2}{\partial t} = q n_{s2} E_{s2}(\varepsilon_2) v_{s2}(\varepsilon_2) \quad (2-28)$$

Система уравнений (2-27)÷(2-28) совместно с уравнением Пуассона и с системой уравнений (2-14)÷(2-23), позволяет решать задачу расчета характеристик гетероструктурных полевых транзисторов с учетом поперечного пространственного переноса электронов в квазидвумерной КЯ структуры.

С одной стороны, квазидвумерное (т.е. одномерное для дрейфа) приближение не позволяет корректно проводить расчеты при высоких напряжениях на стоке транзистора и рассматривать различные эффекты, связанные с лавинным пробоем. В то же время, данная система уравнений описывает динамику электронов существенно точнее, чем различные приближения в температурных моделях [154], и для гетероструктур на основе GaAs уступает по точности только непосредственному решению кинетического уравнения [175, 122, 128]. Важно, что изменение формы и положения

статического домена часто наступает сразу после перехода на участок насыщения выходных ВАХ, то есть при достаточно низких напряжениях на стоке.

В данной системе уравнений поперечный пространственный перенос может быть исключен при задании условия $\tau_{1,2} = \infty$.

Радикальное отличие гетероструктур с донорно-акцепторным легированием от традиционных состоит в том, что локализирующие потенциальные барьеры должны приводить к сильному уменьшению роли поперечного пространственного переноса электронов между слоями гетероструктуры [149,187]. Используемая модель, конечно, не может описать все особенности таких транзисторов, особенно связанные с резким усилением роли размерного квантования, однако можно рассмотреть два предельных случая: поперечный пространственный перенос учитывается с использованием традиционных приближений [154] и поперечный пространственный перенос практически отсутствует.

На рисунке 2-26 приведены рассчитанные распределения напряженности электрического поля, на рисунках 2-27, 2-28 - интенсивности тепловыделения по длине транзистора (от истока к стоку) с учетом поперечного пространственного переноса и в случае, когда он исключен. Расчет проводился для прибора с длиной затвора 0,25 мкм (расстояние от истока до затвора 0,1 мкм) для гетероструктуры $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}-\text{GaAs}$ при подвижности электронов $1000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ в широкозонном и $5400 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ в узкозонном материале (толщина спейсера 10 \AA) при положительном (+0,4 В) напряжении на затворе.

Видно принципиальное отличие в результатах двух вариантов расчета. В случае, когда пространственный перенос электронов не учитывается, домен сильного поля может занимать всю область между затвором и стоком транзистора. Важным отличием также является то, что интенсивности тепловыделения в узкозонном и широкозонном материалах – близки в расчетах без учета поперечного пространственного переноса, а в расчетах с учетом

поперечного переноса, в слое канала тепло почти не выделяется – основное тепловыделение происходит в широкозонных слоях, обрамляющих слой канала.

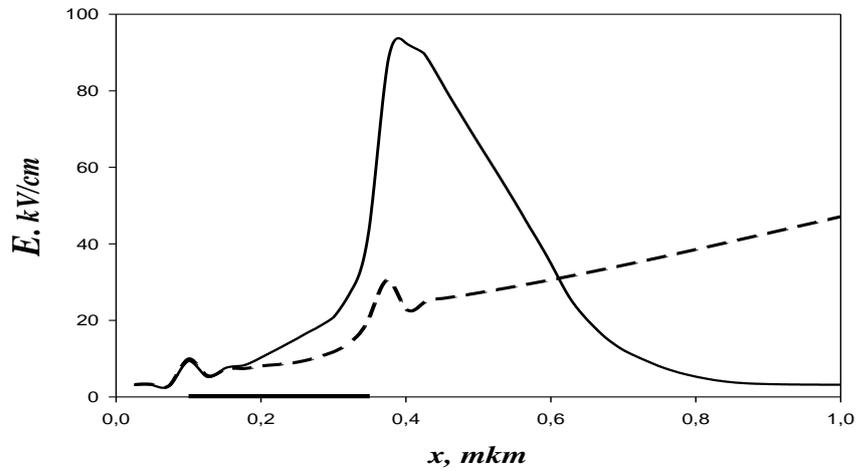


Рис. 2-26. Распределение напряженности электрического поля по длине транзистора (от истока к стоку).

На рисунке 2-26 сплошная линия – результат с учетом поперечного пространственного переноса. В случае, когда поперечный пространственный перенос исключен, результат представлен штриховой линией.

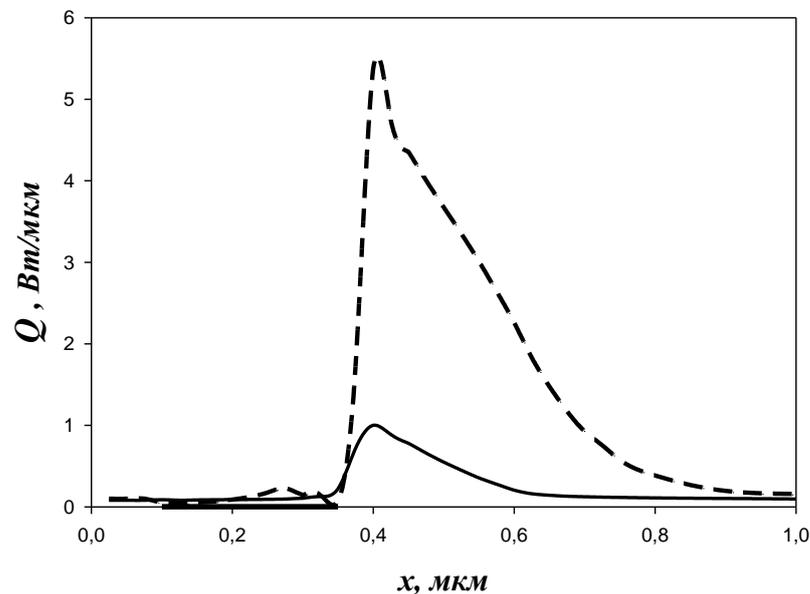


Рис. 2-27. Распределение интенсивности тепловыделения от истока к стоку с учетом поперечного пространственного переноса: для слоя канала – сплошная линия, для широкозонного слоя - штрих - линия.

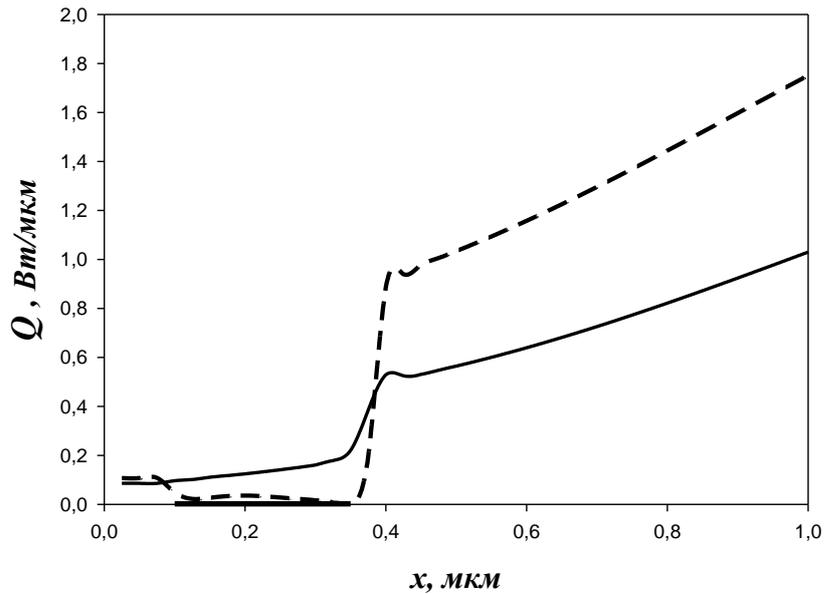


Рис. 2-28. Распределение интенсивности тепловыделения от истока к стоку в случае, когда поперечный пространственный перенос исключен: для слоя канала – сплошная линия, для широкозонного слоя – штриховая линия.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что описанный выше механизм и ведет к жесткой локализации домена сильного поля у стокового края затвора. Кроме того, можно предположить, что если уменьшить вклад рассеяния электронов в широкозонном материале (например, создав локализирующие потенциальные барьеры, как в DA - структурах), то в открытом транзисторе можно добиться смещения расположения 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 [219].

2.5.2. Тепловые характеристики полевых транзисторов

Одним из важных факторов ограничения выходной СВЧ мощности транзисторов на основе GaAs является сильный перегрев, возникающий в процессе работы из-за относительно большого теплового сопротивления GaAs. В мощных полевых транзисторах, из-за относительно низкой теплопроводности, основной вклад в тепловое сопротивление дает именно подложка GaAs. Для сохранения механической прочности и простоты монтажа, в приборе желательно сохранить достаточную толщину подложки (обычно примерно 100 мкм), но при таких подложках величина перегрева транзистора может возрасти до недопустимых величин. Температура активной области прибора растет при увеличении толщины подложки и уменьшении расстояния между секциями транзистора (периода структуры), что ведет к падению подвижности электронов, как следствие к уменьшению протекающего через транзистор тока стока и соответственно, к уменьшению коэффициента усиления и выходной мощности [221,87]. С другой стороны, при увеличении рабочих частот мощных СВЧ усилителей и полевых транзисторов, для улучшения их характеристик за счёт уменьшения времен пролета и роли паразитных элементов, часто требуется максимальная плотность упаковки прибора (минимизация размеров расстояний между истоком, затвором и стоком в одиночной секции транзистора). В числе прочих ограничений, максимально возможная плотность упаковки прибора ограничена максимально допустимой температурой канала, при превышении которой начинаются интенсивные деградиационные процессы [87] (для транзисторов на основе GaAs её обычно принимают равной 150° С). Поэтому во многих, применяемых в настоящее время, конструкциях приходится уменьшать толщину GaAs подложки до 25-30 мкм, а для сохранения механической прочности - наращивать снизу толстый слой золота (~30 мкм) [222,223]. Многие годы при работе в X – диапазоне и выше, удельная выходная мощность полевых транзисторов на основе GaAs гетероструктур из – за многочисленных физических, конструкционных и технологических ограничений существенно не превосходила

величину 1 Вт/мм. Конструкции транзисторов проектировались на тепловыделение, соответствующее этой величине удельной выходной мощности. Однако, с появлением DA-DpHEMT гетероструктур [149,150,187,224] величина удельной выходной мощности уже выросла в два раза, в перспективе возможно еще большее увеличение, что делает тепловые режимы работы таких приборов гораздо более напряженными. В этом разделе проводится исследование тепловых режимов работы DA-DpHEMT транзисторов с обычными и с перспективными вариантами их конструкций.

Расчет процесса теплопередачи проводился на основе 3D уравнения стационарной теплопроводности, учитывающей температурную зависимость коэффициента теплопроводности GaAs. Трехмерный характер используемого уравнения позволяет учесть влияние отдельных элементов конструкции транзистора, что дает возможность нахождения условий максимально сильного отвода тепла. Расчет проводился для транзисторов с периодами расположения секций затворов (расстояниями между затворами в соседних секциях транзисторов) 14 и 28 мкм. Толщины подложек в транзисторах задавались равными 25 и 100 мкм. При расчетах полагалось, что чип транзистора имеет ширину 600 мкм, расстояние от границ прямоугольных габаритов топологии транзистора до края чипа задавалось равным 200 мкм. Толщина металлизации шин истока и стока задавалась равной 2 мкм. Учитывалось, что транзистор монтируется методом пайки на медное основание толщиной 2 мм, температура на нижней грани которого считалась неизменной. При вариациях выделяемой мощности она задавалась равной двум характерным величинам: $T=23^{\circ}\text{C}$ и $T=80^{\circ}\text{C}$.

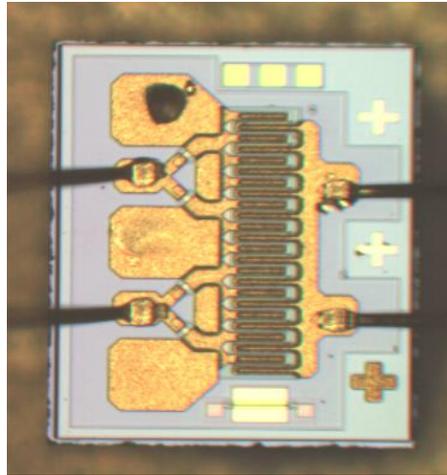
На нижней стороне подложки транзистора толщиной 100 мкм, предусматривалось наличие слоя золота толщиной 5 мкм и слоя припоя Sn:Au, толщиной 20 мкм. На нижней стороне подложки транзистора толщиной 25 мкм предусматривалось наличие слоя гальванического золота толщиной 30 мкм и слоя припоя Sn:Au, имеющего толщину, равную 20 мкм.

Точно промоделировать состав слоев после пайки транзистора на медное основание в корпусе достаточно проблематично (это требует серьезных дополнительных исследований), поэтому задание слоев на нижней стороне подложки является модельным и предназначено исключительно для полуколичественного прогноза их влияния на тепловой режим. Области выделения тепла в транзисторе задавались расположенными у стоковых краев секций затвора транзистора с равномерным распределением удельной мощности по всей длине каждой одиночной секции. Поперечный размер каждой области тепловыделения задавался равным 0,3 мкм [9], а ее толщина равной 0.1 мкм (это приблизительная толщина активного слоя с учётом тепловой диффузии). Рассматривались конструкции транзисторов с длинами секций (пальцев) затвора, равными 50 и 100 мкм при суммарной (по всем секциям) ширине затвора 1,2 и 2,4 мм соответственно. Существует некоторая неопределённость при задании величины теплопроводности гальванического золота. Считается, что эта величина определяется режимами осаждения золота и, как правило, она в 2 – 3 раза меньше, чем у напыленного Au, поэтому при расчетах использовалось несколько характерных величин. Фотография серийного транзистора, схематическое изображение исследуемого прибора и характерные параметры, использованные при расчётах, приведены на рисунке 2-29 и в таблице 15.

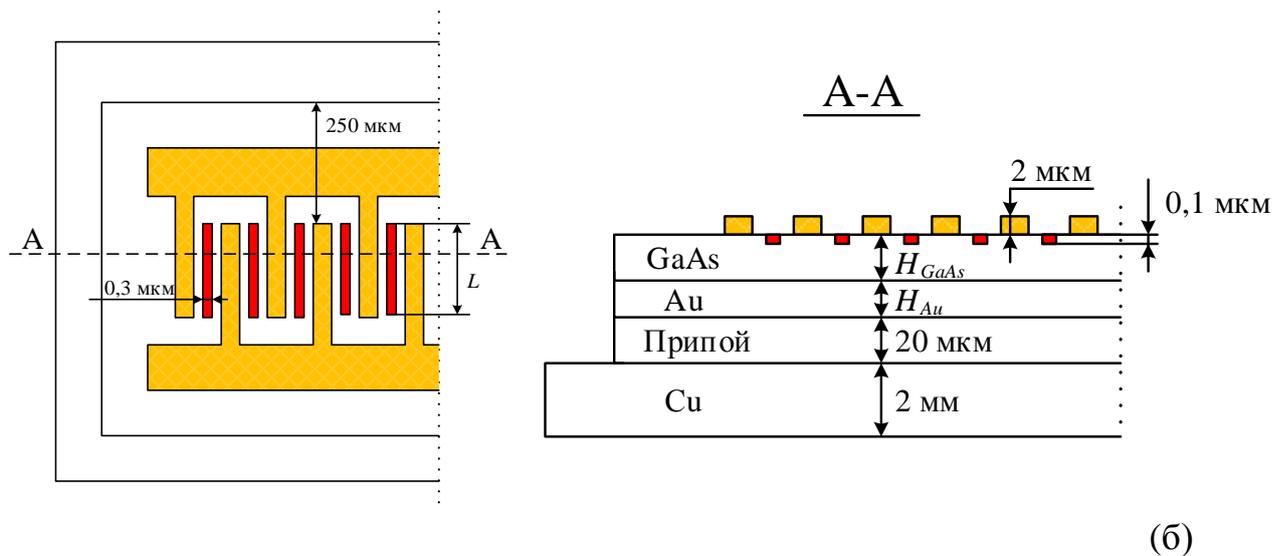
Таблица 15. Параметры тепловой модели транзистора.

Длина секций затвора	L	50, 100 мкм	
Толщина подложки	H_{GaAs}	25 мкм	100 мкм
Толщина гальванического золота	H_{Au}	30 мкм	5 мкм
Коэффициент теплопроводности гальванического золота	k	100, 200, 300 Вт/(м·К)	
Температура основания	T_0	23, 80 °С	
Мощность на единицу длины затвора	W	1, 2, 3, 4 Вт/мм	
Шаг между затворами	h	14 мкм	28 мкм

В таблице 15 мощность W есть именно та удельная тепловая мощность, выделение которой в кристалле многосекционного транзистора приводит к перегреву кристалла относительно медного основания на корпусе и к формированию трехмерного распределения температуры.



(а)



(б)

Рис. 2-29. (а) - фотография транзистора, (б) - схематическое изображение сечения прибора. Красным показано расположение области тепловыделения.

Известно, что температура канала сильно меняется по трем координатам – в направлении длины каждой одиночной секции, в поперечном направлении, и по направлению к медному основанию, отводящему тепло [222,223,225], что подтверждается и расчётами по построенной 3D модели, смотри рисунок 2-30. С учётом малости размеров индивидуальных областей тепловыделения для каждой секции транзистора, измерить максимальную температуру в этих областях работающего в усилительном режиме транзистора достаточно сложно. Поскольку

разрешение даже самых прецизионных тепловизоров не превышает нескольких микрон, то измеряться будет совершенно другая, меньшая величина, являющаяся результатом усреднения по существенно большему размеру области измерения. Максимальная температура канала, пересчитываемая из результатов экспериментов по деградации, фактически находится при условии равномерного нагрева транзистора. В связи с этим возникает закономерный вопрос, как эта температура соотносится с максимальной температурой канала, получаемой при расчетах в каждой индивидуальной области тепловыделения.

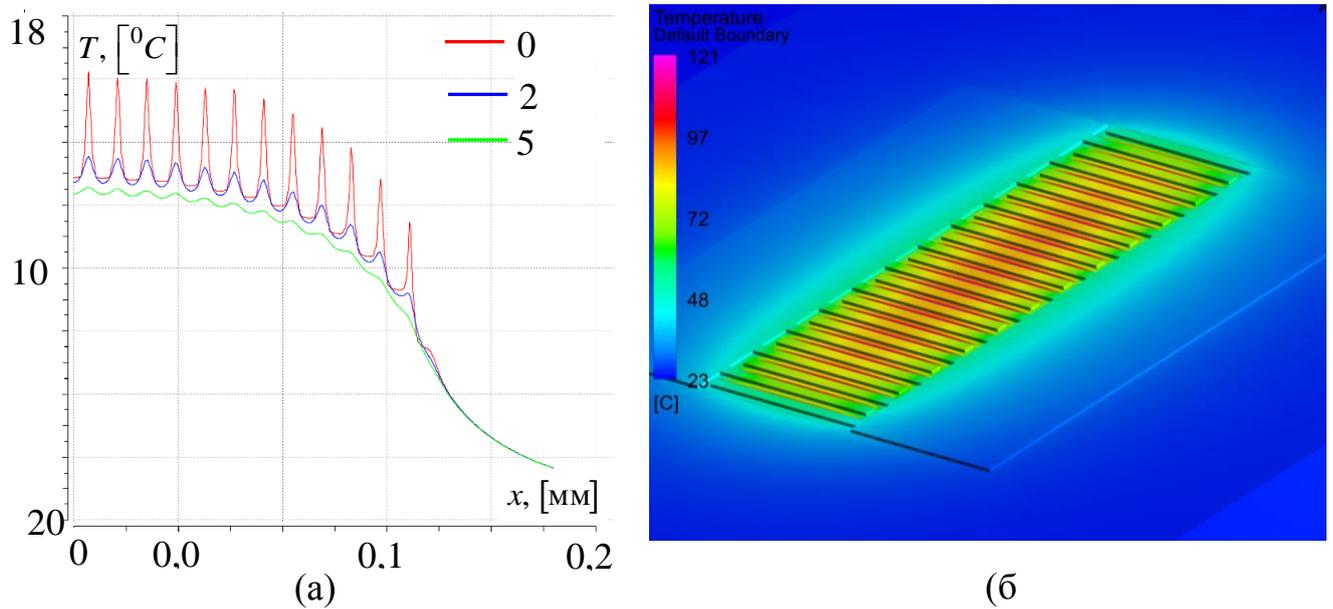


Рис. 2-30. (а) Распределение температуры по центру активной области в направлении, перпендикулярном секциям транзистора параллельно поверхности структуры. (б) Распределение температуры по поверхности транзистора.

Результаты, приведенные на рисунке 2-30, получены при следующих условиях. Задано: $W=1$ Вт/мм, что соответствует удельной СВЧ мощности 1 Вт/мм при «А» режиме усиления (КПД = 50%), длина каждой секции 100 мкм, толщина подложки 100 мкм, температура основания 23° С, период затвора 14 мкм. Отсчет координаты ведется от середины транзистора. Красная кривая – температура на поверхности транзистора, синяя кривая – температура на 2 мкм ниже поверхности транзистора, зеленая кривая – температура на 5 мкм ниже

поверхности транзистора. При расчетах задавалось: температура основания 23°C , толщина подложки 100 мкм, длины секций истока, затвора и стока 50 мкм.

Известно, что все транзисторы на DrHEMT -гетероструктурах при отдаваемой в нагрузку удельной СВЧ мощности чуть менее 1 Вт/мм, выдерживают испытания на надёжность при работе в непрерывном режиме. Поэтому, на первый взгляд, в качестве температуры начала сильной деградации можно брать наибольшее значение максимальной температуры в канале, которое будет вычислено в одном из рассматриваемых вариантов при задании удельной тепловой мощности, равной 1 Вт/мм. При расчете распределения температуры с привязкой к выходной СВЧ мощности и к виду режима усиления, естественно, большое значение имеет КПД транзистора, учитывающий вклад мощности постоянного тока в рабочей точке в полную мощность, определяющую разогрев транзистора.

Для характерных оценок теплового режима по максимуму при работе в А-режиме усиления КПД можно принять равным 50% (в этом случае на разогрев кристалла транзистора идёт удельная мощность постоянного тока, выделяемая в рабочей точке и равная удельной выходной СВЧ мощности, выделяемой в сопротивлении нагрузки). Естественно, при этом условии считается, что при меняющемся во времени СВЧ потенциале затвора $U_g(t)$ изображающая точка на годографе $J_D(t) = J_D(U_D(t))$ выходных ВАХ транзистора в среднем по периоду изменения $U_g(t)$ перемещается по кривой постоянной мощности $J_D(t) \cdot U_D(t) = \text{const}$, равной мощности постоянного тока, выделяемой в рабочей точке при А – режиме усиления.

Так как транзисторы даже с длиной секции 100 мкм при всех типах испытаний не деградируют ни при толщине подложки 100 мкм и периоде структуры 28 мкм, ни при толщине подложки 25 мкм и периоде структуры 14 мкм, то вычисленная максимальная температура канала, достигающая $160 - 170^{\circ}\text{C}$ (она несколько превышает величину, равную 150°C) в локализованных у

секций затвора областях выделения тепла, смотри рисунки 2-30, 2-31, 2-32, вполне согласуется с фактической возможностью работы этих приборов.

Максимальная температура на поверхности транзистора вычисляется в центре топологической площадки, занимаемой транзистором. При отступлении от центра даже на сравнительно незначительное расстояние, температура заметно изменяется, смотри рисунок 2-30. Поскольку испытания транзисторов с длинами секций, равными 100 мкм, проводились при удельной выходной СВЧ мощности несколько меньше 1 Вт/мм, полученный при расчетах результат соответствует традиционной критической температуре 150° С, которая в дальнейшем и будет использоваться для оценок результатов.

Надо отметить, что главное влияние перегрев канала оказывает на надёжность транзистора, но кроме этого, по оценкам, перегрев канала на 100 градусов [226] приводит к падению коэффициента усиления на 1 – 2 дБ и падению выходной мощности на 10 – 20 % - в зависимости от режима работы, конструкции транзистора и характеристик гетероструктуры.

Следует отметить важность учёта температурной зависимости коэффициента теплопроводности GaAs. Как видно из рис. 2-31, 2-32, вычитание из результатов, полученных при температуре основания $T_0=80^\circ\text{C}$, разницы в 57°C не приводит к совпадению с кривой, полученной при $T_0=23^\circ\text{C}$.

Проведем простейшие оценки.

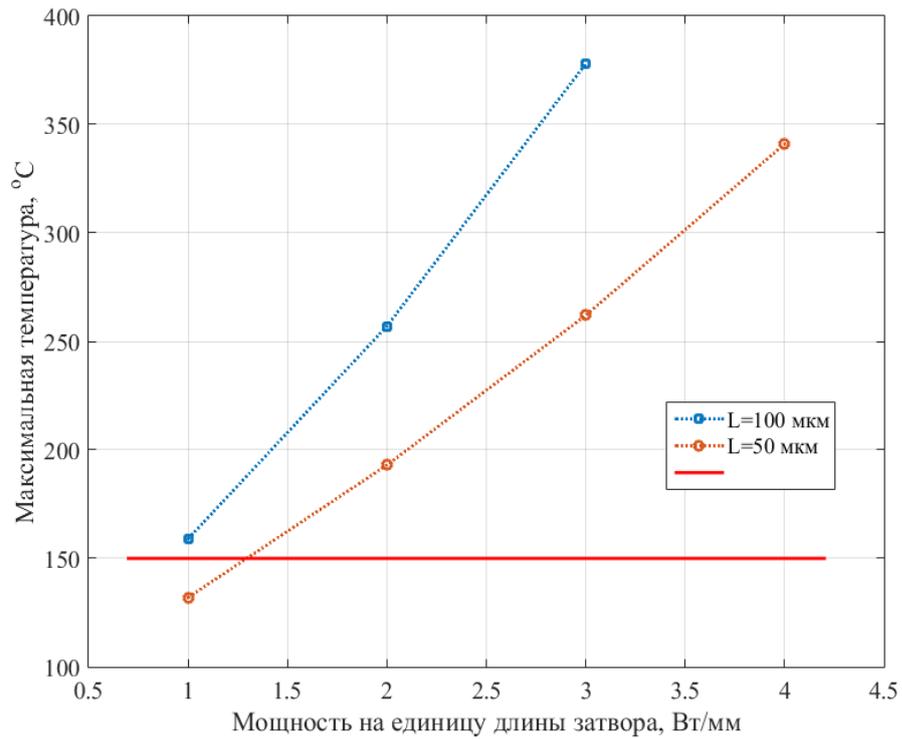
Если не учитывать трехмерной специфики задачи, то R_{T1} - удельное тепловое сопротивление транзистора при толщине подложки H_1 равной 100 мкм и при теплопроводности гальванического золота $k_{Au} = 200 \text{ Вт/мК}$, примерно в три раза выше, чем у транзистора при толщине подложки H_2 , равной 25 мкм с удельным тепловым сопротивлением R_{T2} :

$$\frac{R_{T1}}{R_{T2}} \approx \frac{H_1/k_{GaAs}}{H_2/k_{GaAs} + H_{Au}/k_{Au}} \approx 3.2$$

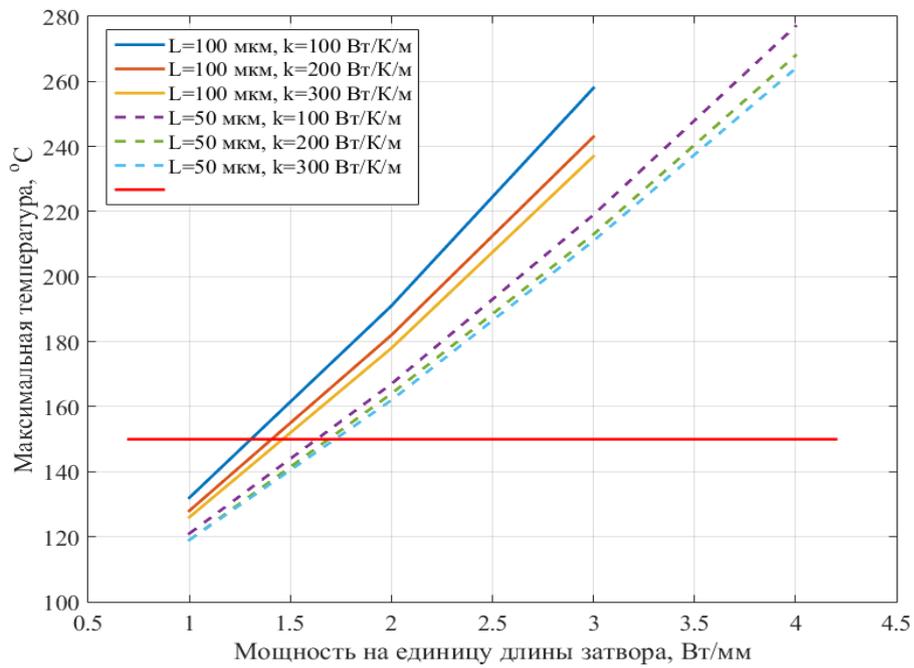
а значит и перегрев транзистора с толщиной подложки 25 мкм и периодом 14 мкм должен быть заметно (примерно в полтора раза) ниже, чем у прибора с толщиной

подложки 100 мкм и периодом 28 мкм. Однако более точные результаты, получаемые при решении трехмерной задачи, это предположение не подтверждают.

На рисунках 2-31÷2-34 приведены зависимости максимальной температуры канала (в центре многосекционного транзистора) от удельной выходной СВЧ мощности, выделяемой транзистором при различных температурах основания корпуса T_0 , длинах секций L , толщинах подложки H_{GaAs} , толщинах слоя золота H_{Au} и периодах секций затворов h .

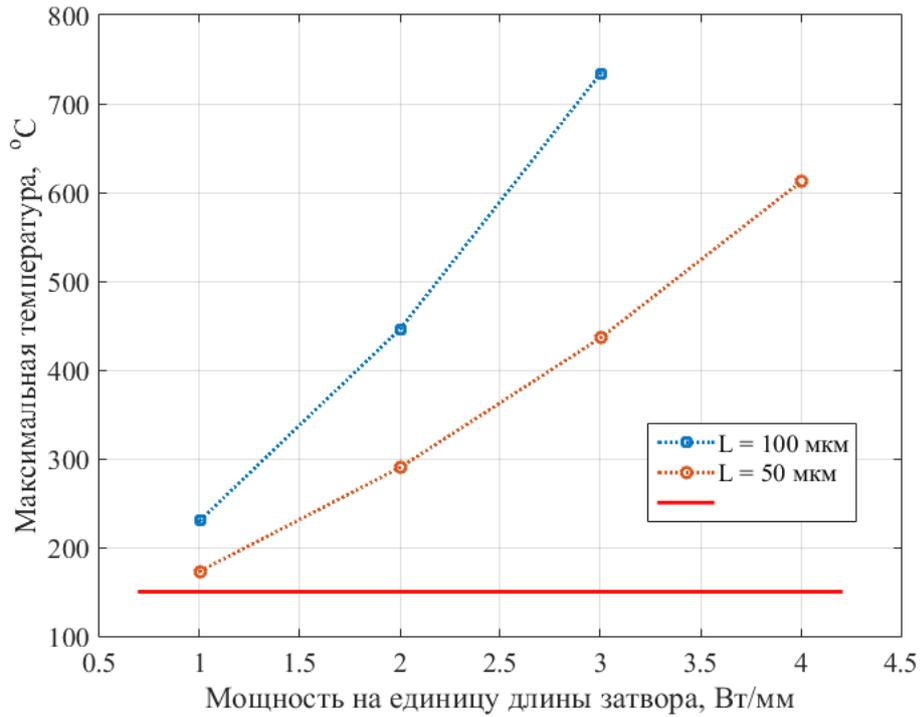


(a)

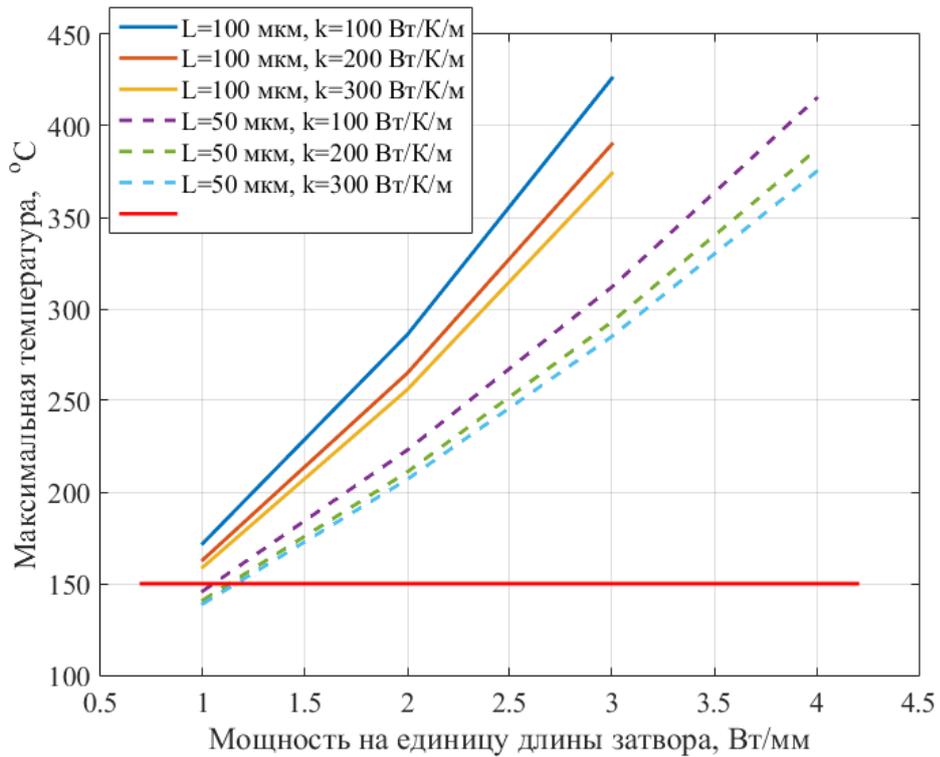


(б)

Рис. 2-31. Зависимости максимальной температуры канала (в центре многосекционного транзистора) от удельной выходной СВЧ мощности. Параметры расчета: $T_0 = 80$ C, $h = 28$ мкм, $KПД = 50\%$ (а): $H_{GaAs} = 25$ мкм, $H_{Au} = 30$ мкм. (б): $H_{GaAs} = 100$ мкм, $H_{Au} = 5$ мкм.



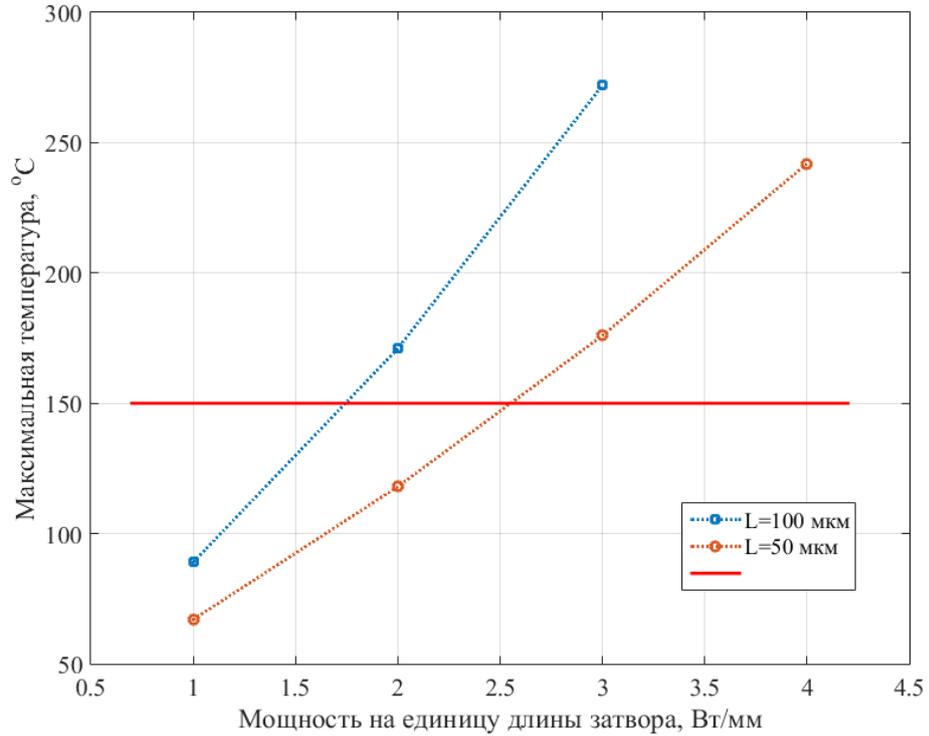
(а)



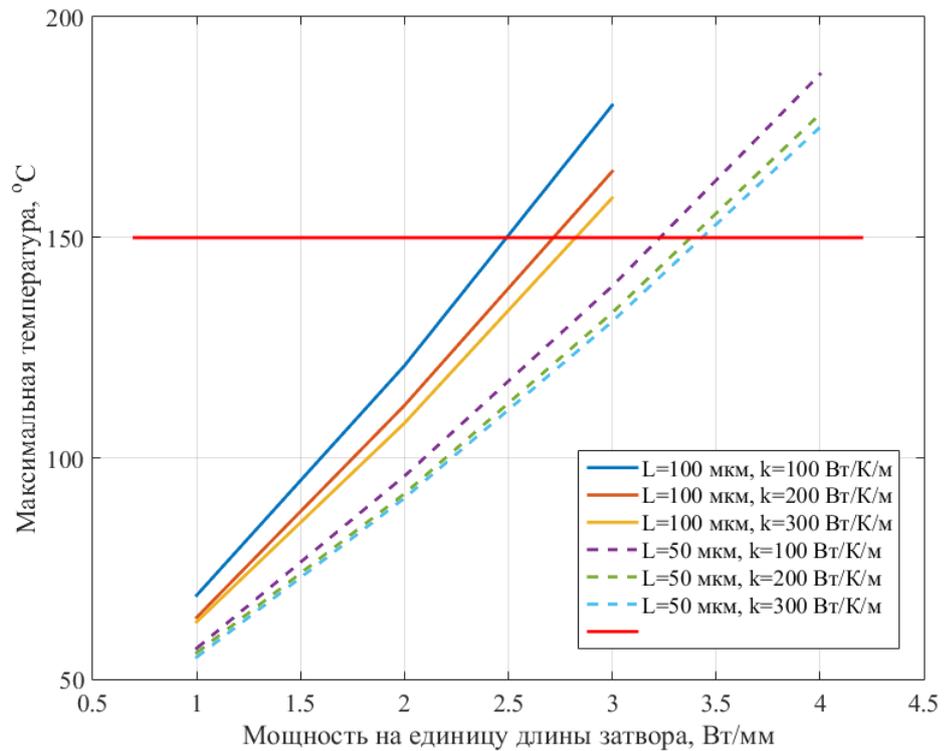
(б)

Рис. 2-32. Зависимости максимальной температуры канала (в центре многосекционного транзистора) от удельной выходной СВЧ мощности.

Параметры расчета: $T_0 = 80^\circ \text{C}$ $h = 14 \text{ мкм}$, $KПД = 50\%$, (а): $H_{GaAs} = 25 \text{ мкм}$ $H_{Au} = 30 \text{ мкм}$, (б): $H_{GaAs} = 100 \text{ мкм}$, $H_{Au} = 5 \text{ мкм}$.



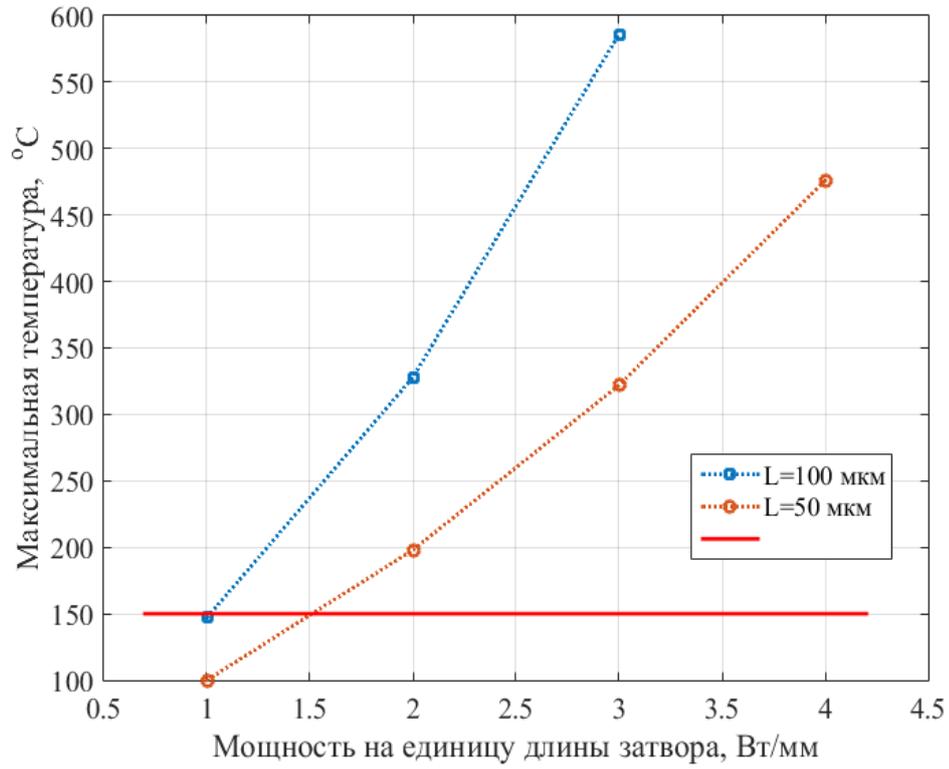
(а)



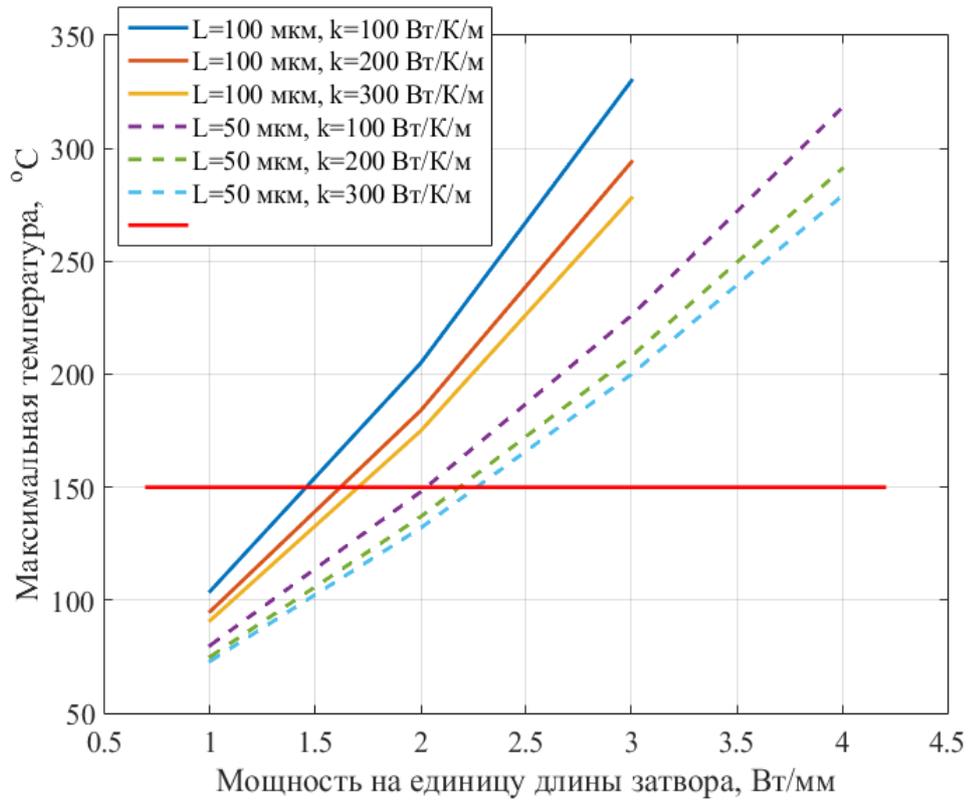
(б)

Рис. 2-33. Зависимости максимальной температуры канала (в центре многосекционного транзистора) от удельной выходной СВЧ мощности.

Параметры расчета: $T_0 = 23^\circ \text{C}$ $h = 28 \text{ мкм}$ $\text{КПД} = 50\%$ (а): $H_{\text{GaAs}} = 25 \text{ мкм}$ $H_{\text{Au}} = 30 \text{ мкм}$, (б): $H_{\text{GaAs}} = 100 \text{ мкм}$, $H_{\text{Au}} = 5 \text{ мкм}$.



(а)



(б)

Рис. 2-34. Зависимости максимальной температуры канала (в центре многосекционного транзистора) от удельной выходной СВЧ мощности. Параметры расчета: $T_0 = 23^\circ \text{C}$, $h = 14 \text{ мкм}$, $KПД = 50\%$; (а) $H_{GaAs} = 25 \text{ мкм}$, $H_{Au} = 30 \text{ мкм}$, (б) $H_{GaAs} = 100 \text{ мкм}$, $H_{Au} = 5 \text{ мкм}$.

Результаты вычислений 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. Этот результат получен при задании коэффициента теплопроводности гальванического золота равного 300 Вт/(м·К). Таким образом, уменьшение толщины подложки в четыре раза при учете 3D растекания тепла, учете теплового сопротивления слоя гальванического золота и припоя, уменьшает полное тепловое сопротивление максимально нагретой области транзистора всего лишь вдвое, а не почти в 3,5 раза как это следует из простых оценок, не учитывающих 3D эффект растекания тепла.

2. При одинаковой удельной выходной СВЧ мощности транзистора, максимальная температура в канале транзистора при длине секции, 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, равном 28 мкм, КПД равном 50% и длине секции, равной 50 мкм, транзисторы при удельной выходной СВЧ мощности более 3 Вт/мм (потенциально достижимой в GaAs DA-DpHEMT транзисторах), нагреваются до максимальных температур выше 150° С (что недопустимо для транзисторов на основе GaAs) 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 секции, равной 100 мкм, нагрев недопустимо велик - выше 150°C при температуре основания 23°C .

Расчеты показали, что при уменьшении толщины подложки в 4 раза (до 25 мкм), из-за монтажа транзистора на основание корпуса с промежуточными слоями Au и припоя Sn:Au, при КПД равном 50%, и при тепловых режимах, соответствующих «А» - режиму усиления, удельную выходную СВЧ мощность транзистора можно увеличивать не более 2 раз – до величины 2 Вт/мм.

Следует отметить, что тривиальное уменьшение толщины GaAs подложки НЕМТ транзистора, конечно, дает уменьшение ее теплового сопротивления, но приводит как к увеличению паразитных емкостей «затвор – основание корпуса» и «сток – основание корпуса» так и к заметному разбросу характеристик приборов из-за того, что при изготовлении очень тонких подложек увеличивается относительная погрешность в толщинах. Меры по увеличению точности изготовления сверхтонких подложек требует заметного усложнения технологии.

Возникает закономерный вопрос, насколько можно улучшить теплоотвод при фиксированной толщине достаточно толстой подложки с учётом возможности усиления переноса тепла в медное основание?

Рассмотрим предельный случай – при толщине подложки 25 мкм заменим в расчётах промежуточный слой Au и слой припоя Sn:Au на слой поликристаллического алмаза или на слой графена [227,228] с очень хорошей теплопроводностью. Также положим, что алмазный тепловой интерфейс непосредственно, т.е. без промежуточного слоя припоя Sn:Au толщиной 20 мкм соединен с медным основанием корпуса. Результаты этой замены представлены на рисунке 2-35.

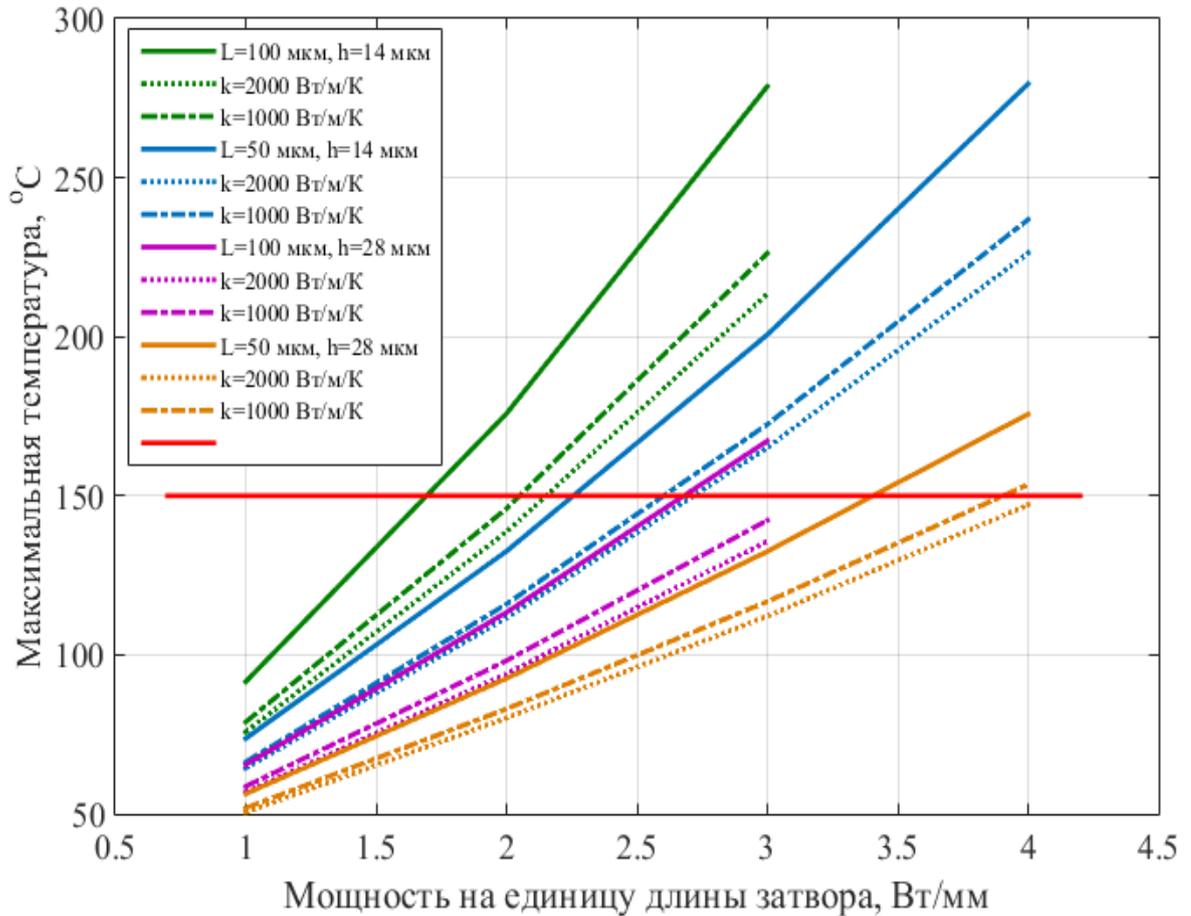


Рис. 2-35. Зависимости максимальной температуры канала (в центре многосекционного транзистора) от удельной выходной СВЧ мощности. Параметры расчета: $H_{GaAs} = 25$ мкм. Сплошные линии – при $H_{Au} = 30$ мкм и 20 мкм толщине слоя Sn:Au припоя. Пунктир – результаты при введении алмазного интерфейса на нижней стороне подложки. $T_0 = 23$ °С КПД = 50%.

Естественно, в такой идеализированной ситуации максимальная температура транзистора заметно упадёт. Видно, что при комнатной температуре в зависимости от периода структуры и длины секции конструкция с алмазным интерфейсом на подложке позволила бы увеличить максимально допустимую тепловую мощность примерно на 20 – 30 %, что, в принципе, очень неплохо, но до конца проблему теплоотвода не решает. По-видимому, подобная технология для арсенида галлия будет достаточно эффективна только при дальнейшем уменьшении подложки аналогично [227,228], что как отмечалось выше, нежелательно.

2.5.3. Алмазоподобное покрытие

Проведенные расчёты показывают, что без существенного уменьшения толщины арсенид-галлиевой подложки серьёзно улучшить теплоотвод традиционными способами вряд ли удастся. Существует много идей дальнейшего улучшения теплоотвода в сторону подложки (отвод тепла вниз) [223], сводящихся по сути дела к уменьшению её толщины, и некоторые успешно используются, например, в нитрид-галлиевых полевых транзисторах [227,228], однако они или сталкиваются со значительными технологическими трудностями, или требуют кардинальной перестройки технологии изготовления прибора.

Проведенные нами исследования позволяют выдвинуть принципиально иную идею – вместо того чтобы пытаться улучшить отвод 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 тепла в основание на корпусе через полупроводниковую подложку. Сделать это 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.

Естественно, при этом придется решать ряд технологических проблем: например, подбирать материал и толщину покрытия так, чтобы оно или кристалл не разрушались при перегреве от термических напряжений. Весьма привлекательным вариантом представляется холодное нанесение на поверхность кристалла эффективно проводящего тепло (с теплопроводностью около 50 Вт/(м·К) или больше) клея или лака – изолятора после монтажа транзистора на теплоотводящее основание корпуса. Это позволило бы полностью избежать термических напряжений при монтаже (пайке) а термические напряжения при эксплуатации из-за малого перегрева были бы несущественны. К сожалению, в настоящее время доступна лишь широкая номенклатура клеев с высокой

теплопроводностью (порядка 60 - 80 Вт/мК) с наполнителем на основе серебра, которые являются хорошими проводниками и поэтому совершенно непригодны для дополнительного теплового интерфейса. Кроме этого, применение органических материалов в составе конструкции транзисторов нежелательно из-за сопутствующего снижения спецстойкости. Принципиально важно, что существуют низкотемпературные способы нанесения алмазоподобных покрытий [229,230], совместимые с технологиями арсенид-галлиевых и нитрид-галлиевых приборов, такие покрытия являются диэлектриками и с успехом могут быть использованы в качестве дополнительного теплового интерфейса. В настоящее время с помощью нанотехнологий [231] активно разрабатываются материалы с совершенно новыми свойствами и, возможно, уже в ближайшее время будут разработаны иные типы диэлектрических материалов с высокой теплопроводностью.

Ранее близкие по сути идеи по отводу тепла от поверхности приборов уже высказывались, например, в методе обратного монтажа кристаллов [222], или применение алмазного покрытия в нитрид-галлиевых транзисторах [229]. Однако в первом случае этот способ не слишком эффективен из-за очень малого поперечного размера областей локального тепловыделения в полевых транзисторах [225]. Во втором случае проблема связана с тем, что теплопроводность нитрида галлия (220 Вт/(м·К)) больше теплопроводности арсенида галлия (44 Вт/(м·К)) как минимум в пять раз [232,233]. Поэтому обычный монтаж GaN транзистора без АПП, но с тонкой подложкой непосредственно на алмазное основание [227,228] выглядит более предпочтительным в технологическом плане.

Для проверки эффективности предложенной нами идеи, проведем расчёт распределения температуры в транзисторах при введении сверху на поверхности кристалла теплопроводящего АПП толщиной h_C , (смотри рисунок 2-36), имеющего удельную теплопроводность 1000 Вт/(м·К), (что соответствует поликристаллическому алмазу) для тех же вариантов конструкций, что рассматривались выше.

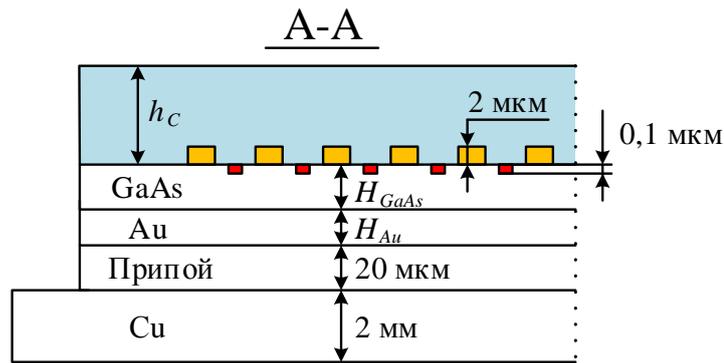
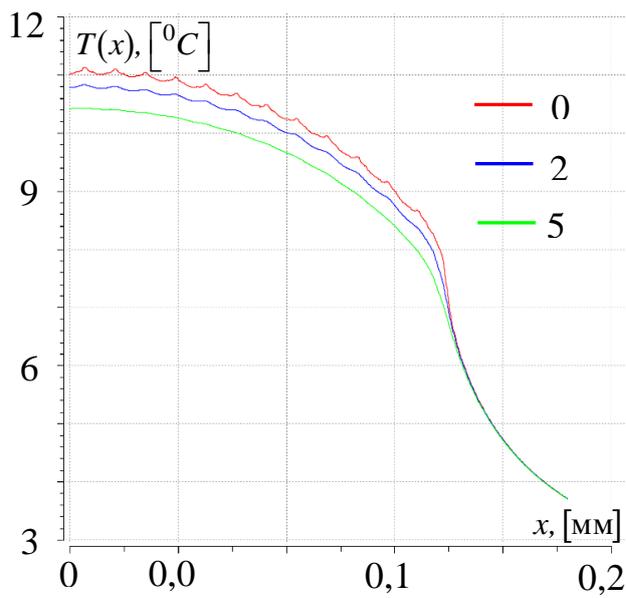


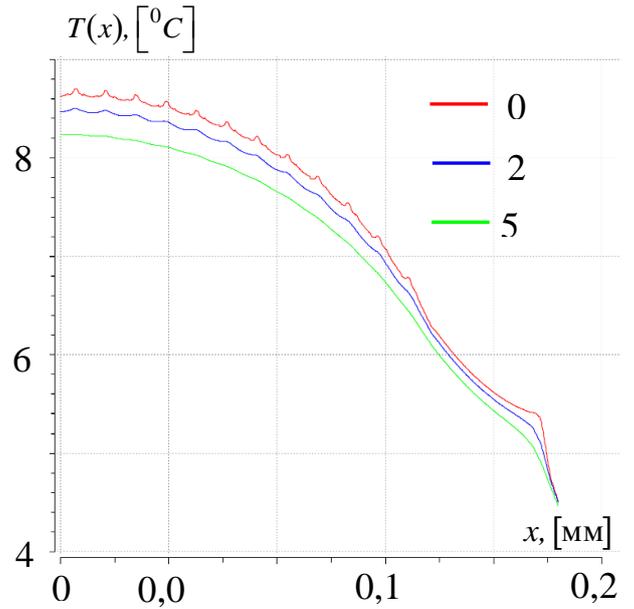
Рис. 2-36. Упрощенный вид продольного разреза мощного СВЧ полевого транзистора с нанесённым сверху слоем АПП толщиной h_c .

Как показали расчёты, профили температуры получаются примерно одинаковыми, если при уменьшении удельной теплопроводности алмазоподобного покрытия пропорционально увеличивать его толщину.

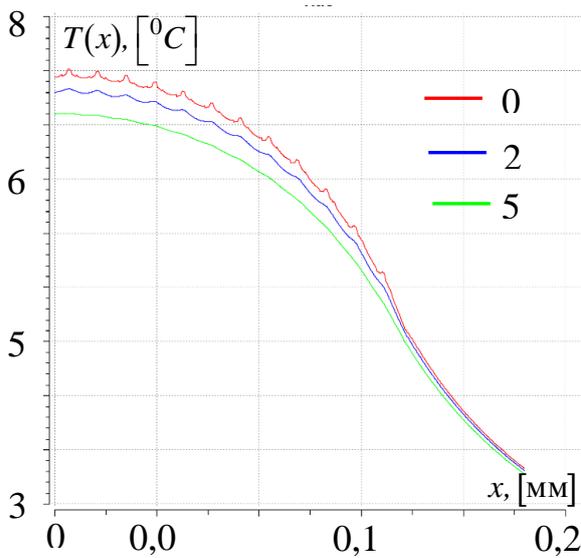
Для выявления эффекта от нанесения АПП, в качестве сравниваемой, используем модель транзистора, результаты для которой представлены на рисунке 2-30. Результаты расчетов представлены ниже для трех вариантов формирования покрытия на исходной модели транзистора. В первом варианте покрытие нанесено только в пределах активной области транзистора (нанесено только поверх секций истока, затвора и стока шириной L на рисунке 2-29), результаты расчетов для этого варианта представлены на рисунке 2-37а. Во втором варианте покрытие нанесено на активную область прибора с расширением области покрытия на 50 μm за её пределы. Результаты расчетов для этого варианта представлены на рисунке 2-37б. В третьем варианте покрытие нанесено по всей площади чипа, соответствующие результаты представлены на рисунке 2-37в.



(a)



(б)



(в)

Рис. 2-37. Распределение температуры от центра транзисторной структуры в направлении, перпендикулярном секциям транзистора параллельно поверхности структуры. Отсчет координаты ведется от центра транзисторной структуры. Температура корпуса: 22° С. Выходная СВЧ мощность: 1 Вт/мм, КПД: 50%, длина секции: 100 мкм, толщина подложки: 100 мкм, температура основания: 23° С.

На рисунке 2-37 АПП толщиной 2 мкм покрывает: (а) - всю активную область транзистора, (б) - всю активную область транзистора и периферию

поверхности чипа вокруг активной области на расстоянии 50 мкм, (в) - всю активную область транзистора и всю поверхность чипа. Красные линии – распределение температуры на поверхности транзистора, синие линии - распределение температуры на 2 мкм ниже поверхности транзистора, зеленые линии - распределение температуры на 5 мкм ниже поверхности транзистора.

Из сравнения результатов на рисунке 2-37 с результатами, приведенными на рисунке 2-30, видно, что при введении АПП величина локальных максимумов температуры (высотой примерно 30°C), связанных с локальными областями тепловыделения, существенно уменьшается. Также на рисунке 2-37 видно, что при расширении площади АПП максимальная температура на поверхности транзистора существенно уменьшается. Сравнительное уменьшение температуры на рисунке 2-37 ещё на 20°C связано с поперечным выравниванием температуры в направлении вдоль секций, что хорошо видно на рисунке 2-38.

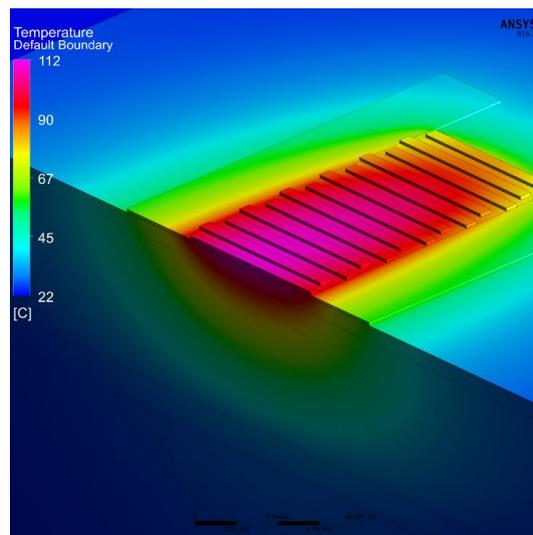


Рис. 2-38. Распределение температуры под слоем АПП по поверхности транзисторной структуры. Толщина АПП: 5 мкм, покрыта только активная область транзистора. СВЧ мощность 1 Вт/мм, КПД равен 50%, длина секции 100 мкм, толщина подложки 100 мкм, температура основания равна 23°C .

При нанесении покрытия по варианту, показанному на рисунке 2-37б, т.е. с напуском АПП на 50 мкм за периферию активной области, температура дополнительно снижается на 25°C , а нанесение АПП на всю поверхность чипа

уменьшает эту величину ещё на 10°C , то есть перегрев уменьшается более чем в 2,5 раза.

Для более детальной демонстрации эффективности введения в конструкцию транзистора теплового интерфейса в виде АПП, на рисунках 2-39, 2-40 приведены зависимости максимальной температуры канала от удельной мощности тепловыделения для различных вариантов исполнения полевых транзисторов: как при отсутствии АПП, так и при различных его толщинах h_C .

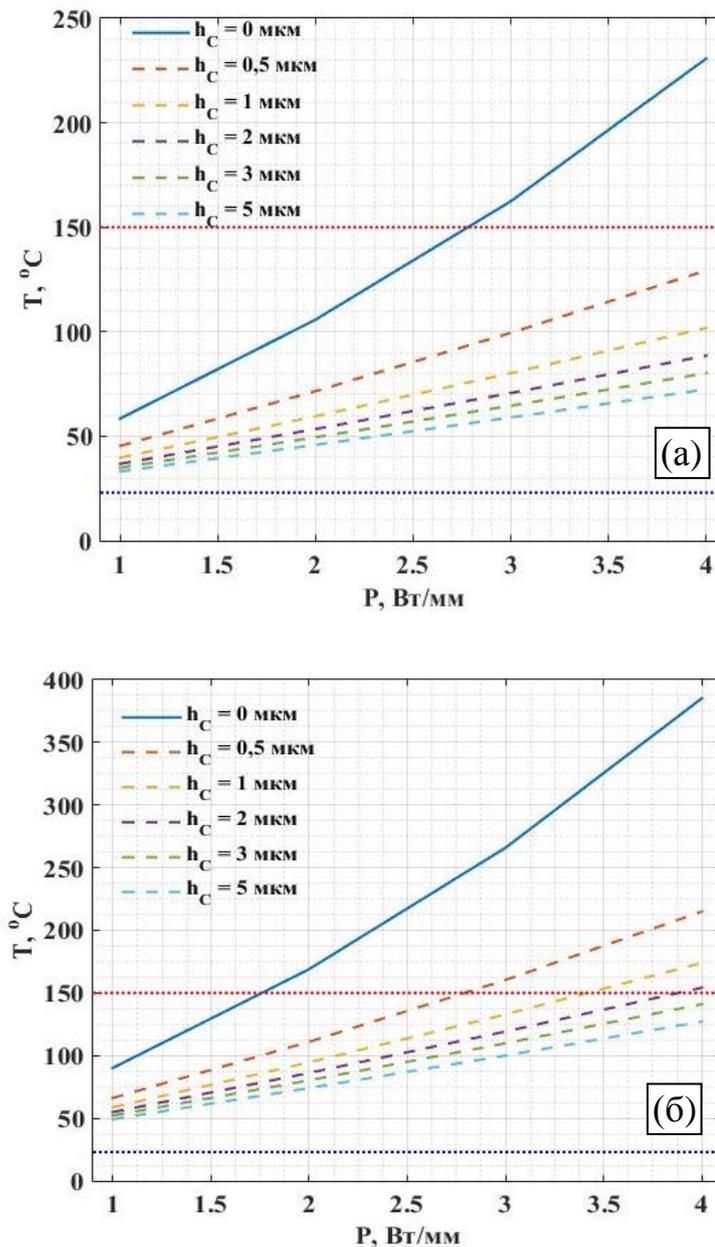


Рис. 2-39. Зависимость максимальной температуры в канале транзистора от удельной мощности тепловыделения.

На рисунке 2-39 (а), (б) - горизонтальная красная пунктирная линия – критическая температура, выше которой начинаются интенсивные процессы деградации, горизонтальная синяя пунктирная линия – температура окружающей среды. Длина секций: 50 мкм (а), 100 мкм (б), толщина подложки 100 мкм, период секций затворов 28 мкм.

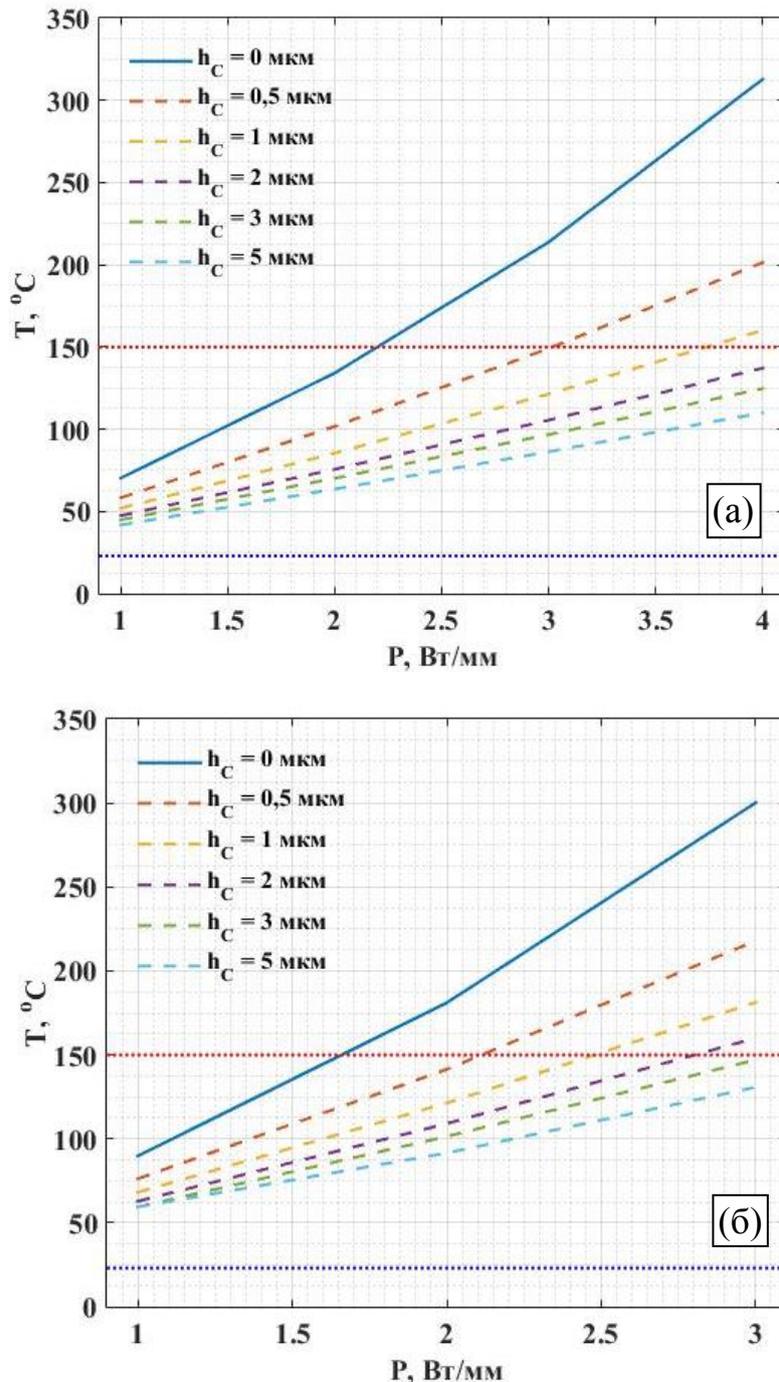


Рис. 2-40. Зависимость максимальной температуры в канале транзистора от удельной мощности тепловыделения.

На рисунке 2-40 (а), (б) - горизонтальная красная пунктирная линия – критическая температура, выше которой начинаются интенсивные процессы деградации, горизонтальная синяя пунктирная линия – температура окружающей среды. Длина секций: 50 мкм (а), 100 мкм (б). Толщина подложки: 25 мкм при слое гальванического золота толщиной 30 мкм и при слое припоя Sn:Au толщиной 20 мкм, период секций затворов равен 14 мкм.

Результаты вычислений для транзисторов с тепловым интерфейсом в виде АПП на поверхности структуры показали следующее:

1. При толщине GaAs подложки 100 мкм и при периоде структуры 28 мкм тепловой интерфейс (с удельной теплопроводностью 1000 Вт/мК и с толщиной более 5 мкм) обеспечивает эффективный отвод тепла в транзисторах с длиной секций 50 мкм при $W \leq 3.5$ Вт/мм и в транзисторах с длиной секций 100 мкм при $W \leq 2.5$ Вт/мм в жестких условиях эксплуатации – работа в непрерывном режиме при температуре окружающей среды 80° С.

2. При толщине GaAs подложки 25 мкм и при периоде структуры 14 мкм тепловой интерфейс (с удельной теплопроводностью 1000 Вт/(мК) и с толщиной более 5 мкм) полностью решает проблему теплоотвода в транзисторах с длиной секций 50 мкм при $W \leq 2.0$ Вт/мм, а в транзисторах с длиной секций 100 мкм - при $W \leq 1.5$ Вт/мм. Решение проблемы теплоотвода достигается при работе в непрерывном режиме и температуре окружающей среды 80° С.

3. Уменьшение длины секций истока, затвора и стока, также как и в результатах расчётов для транзисторов без АПП интерфейса, сильно уменьшает величину перегрева транзистора.

Сравнение поверхностного АПП термоинтерфейса с другими способами усиления отвода тепла.

Представляет практический интерес хотя бы качественно сравнить предложенный способ уменьшения тепловой нагрузки с другими способами. Например, с оригинальным способом уменьшения до нескольких микрометров толщины остающегося после травления подложки буферного слоя GaAs при помощи специального стоп-слоя. Этот стоп-слой выращивается в структуре и предназначен для остановки процесса травления подложки на желаемой глубине [223]. Результаты расчётов, необходимые для такого сравнения, приведены в таблицах 16, 17.

В таблице 16 приведены величины максимальной температуры в центре транзистора при различных величинах выделяемых мощностей и при различной толщине АПП, нанесенного на всю поверхность чипа. Температура корпуса: 80° С.

Таблица 16. Максимальная температура [°С] транзистора с АПП.

Толщина АПП, [мкм]	Выделяемая мощность, [Вт] (Вт/мм)		
	2,4 (1,0)	4,8 (2,0)	7,2 (3,0)
1,0	182,45	295,75	409,71
2,0	165,23	259,05	354,02
3,0	153,83	234,4	316,49
5,0	140,44	205,45	272,28

В таблице 17 приведены значения максимальной температуры в структуре со стоп слоем и тонкой подложкой под активной областью [223], при температуре корпуса 80° С, сверху транзистор не имеет АПП, на подложку снизу нанесен слой гальванического золота. Период структуры 14 мкм, длина секций 100 мкм, выделяемая мощность: 2,4 Вт (удельная мощность 1 Вт/мм).

Таблица 17. Максимальная температура [°C] транзистора с тонкой подложкой под активной областью. АПП отсутствует.

Толщина GaAs-буферного слоя, [мкм]	Толщина гальванического золота, [мкм]	Теплопроводность гальванического золота, [Вт/(м·К)]	Tmax, [°C]
10	90	100	175
10	90	200	154
10	90	300	147
5	95	100	166
5	95	200	144
5	95	300	136

Из таблицы 17 видно, что при величинах удельной теплопроводности гальванического золота менее 200 (Вт/мК) поверхностный АПП тепловой интерфейс при удельной теплопроводности покрытия 1000 Вт/(м·К) и толщине GaAs подложки 100 мкм, уже при толщине АПП, равной 3 мкм, не менее эффективен, чем метод применения стоп-слоя в подложке, ограничивающего глубину ее травления с обратной стороны пластины.

Таким образом, проведенные расчёты показали, что введение в конструкцию транзистора поверхностного теплового интерфейса вплотную к областям локального тепловыделения дает следующее.

Во-первых, сразу сглаживается распределение температуры на поверхности кристалла и всей активной области прибора в направлениях, продольных и поперечных по отношению к направлению ориентации секций транзистора, устраняя все резкие локальные перепады.

Во-вторых, при наличии достаточно толстого слоя АПП открывается второй и из-за высокой теплопроводности покрытия, очень эффективный канал отвода тепла – из областей сильного тепловыделения вверх, далее по слою АПП в

стороны на периферию кристалла транзистора с последующим переносом тепла через подложку в теплоотводящее основание корпуса.

Даже если рассмотреть абсолютно симметричную задачу – всю структуру отобразить относительно верхней поверхности транзистора, мощность тепловыделения оставить прежней, то величина максимального перегрева канала уменьшится в 2 раза.

В техническом решении с верхним расположением АПП, тепловой интерфейс на транзисторе имеет существенно большую, по сравнению с GaAs подложкой, удельную теплопроводность. Естественно, конечный перенос тепла в основание корпуса все равно происходит через арсенид-галлиевую подложку с относительно низкой теплопроводностью, но после введения достаточно толстого слоя поверхностного АПП теплового интерфейса перенос тепла происходит через контакт «подложка – основание корпуса», имеющий площадь, гораздо больше, чем площадь, занимаемая активной областью прибора.

Следует отметить, что вклад каждого из этих механизмов - сглаживания перепадов и отвод тепла вверх, в стороны и далее вниз в основание корпуса, сравнимы, а совместное действие этих механизмов и приводит к тому, что перегрев прибора может уменьшиться в несколько раз. Важным фактором является также то, что в принципе совсем не обязательно наносить теплопроводящий интерфейс полностью на весь чип. Достаточно чтобы он выступал на не слишком большие расстояния за область выделения тепла. Этот факт может, например, исключить необходимость вскрытия окон в АПП покрытия для контактов к шинам истока и стока. При этом следует отметить, что в случае необходимости, окна в АПП достаточно просто можно сформировать методом плазмохимического травления в кислородной плазме.

Кроме того, одно из главных достоинств АПП термоинтерфейса, является то, что при этом вся базовая технология изготовления мощных полевых транзисторов и монолитных усилителей практически не меняется. Как показывают оценочные трехмерные расчёты, формирование АПП

термоинтерфейса не меняет и согласование приборов, а выигрыш от уменьшения перегрева канала транзистора оказывается велик.

2.6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 2

В главе 2 приведены следующие основные результаты работы:

13. Предложен оригинальный способ оценки перспективности использования в составе транзисторов различных вариантов конструкции гетероструктур. Способ основан на анализе амплитуды, длительности и формы всплеска дрейфовой скорости электронов во времени как отклика на импульсное воздействие сильного внешнего продольного электрического поля в канале гетероструктуры.

14. Расчеты показали, что в полевых транзисторах на гетероструктурах с селективным легированием пренебрежение при расчетах инерционностью изменения импульса электронов приводит к существенным (более 20%) погрешностям в распределениях дрейфовой скорости по длине канала транзистора и в его выходных характеристиках при характерных длинах активной области, намного превышающих длину релаксации импульса электронов. Эти погрешности усиливаются сильными продольными градиентами электрического поля в канале, особенностями нелокального разогрева электронов и специфическим для рНЕМТ транзисторов эффектом – сильным поперечным пространственным переносом горячих электронов через границы гетеропереходов слоя канала. Поперечный пространственный перенос электронов приводит к выносу горячих электронов из слоя канала и, как следствие, к увеличению концентрации электронов в широкозонном слое (или в широкозонных слоях, окружающих канал), примыкающему к слою канала.

15. Разница в результатах расчетов по гидродинамическим и температурным моделям достаточно велика для транзисторов с открытым каналом даже при сравнительно больших длинах затвора - порядка 1 мкм. Причина этого заключается в характерном соотношении размеров: поперечные размеры квантовой ямы в канале всегда меньше длины релаксации импульса, при этом поперечные потоки электронов через гетерограницу слоя канала достаточно велики даже при слабых внешних продольных полях.

16. Результаты расчетов характеристик полевых транзисторов на основе гетеропереходов $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ - $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ оказываются гораздо более чувствительными к выбору модели (гидродинамической или температурной), чем результаты расчетов для полевых транзисторов на основе гетеропереходов $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ - GaAs . Причина: сравнительно большая подвижность электронов в канале и сравнительно большая величина перепада дна зоны проводимости на границе гетероперехода в $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ - $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$.

17. Показано, что именно поперечный пространственный перенос приводит к жесткой локализации домена сильного поля у стокового края затвора. Можно предположить, что если уменьшить роль рассеяния электронов в широкозонном слое (например, создав потенциальные барьеры, усиливающие локализацию электронов в канале), то в транзисторе при открытии канала СВЧ сигналом можно добиться перемещения статического домена от затвора к стоку и уменьшения тепловой нагрузки в режиме большого сигнала.

18. На основе теоретического анализа всплеска дрейфовой скорости показано, что, несмотря на большую величину статической дрейфовой скорости в максимуме ее полевой зависимости, быстродействие GaN - транзисторов не выше быстродействия GaAs - транзисторов даже при искусственном задании заниженной величины слабополевой подвижности электронов в GaAs до величины такой же, как в GaN. Соответственно, быстродействие GaN - транзисторов гораздо ниже быстродействия рНЕМТ - транзисторов. Этот эффект связан с тем, что из-за большой энергии оптического фонона, дрейфовая скорость электронов в максимуме на ее распределении в GaN - транзисторах заметно ниже, чем в GaAs - транзисторах. Поэтому экспериментальные зависимости частоты усиления по току от длины затвора показали, что транзисторы на основе GaAs имеют большее быстродействие, чем транзисторы на основе GaN, даже при задании равных и малых величин подвижности электронов. В отличие от GaAs - транзисторов, из-за малых времен релаксации энергии, температурные модели применимы для моделирования поведения GaN - транзисторов даже с короткими

субмикронными затворами. Формально, применимость температурной модели к GaN – транзисторам сохраняется до длин затвора 0.05 мкм.

19. На основе теоретических оценок показано, что *pin* барьеры, усиливающие локализацию горячих электронов в слое канала, увеличивают среднюю дрейфовую скорость горячих электронов в двойных структурах с селективным легированием примерно в 1,5 раза, при этом поверхностную плотность электронов в квантовой яме структуры можно увеличить более чем в два раза. Введение локализирующих *pin* барьеров есть общий способ увеличения быстродействия транзисторов на основе различных видов гетероструктур с увеличенной плотностью электронов.

20. 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 $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$, улучшенная донорно – акцепторным легированием, с помощью которого формируются *pin* барьеры, усиливающие локализацию горячих электронов в слое канала. Преимущество таких структур выявлено даже по отношению к DA-DrHEMT структурам, показавшим рекордные в своем классе характеристики по удельной выходной мощности.

21. Построена трехмерная модель для расчета распределения температуры в транзисторе, позволяющая задавать распределение источников тепла и их удельную мощность, вид топологии элементов конструкции транзистора, послойный состав гетероструктуры, учитывать наличие слоя припоя или токопроводящего клея между подложкой и основанием корпуса.

22. Исходя из критической температуры, равной 150 °С получен набор ограничений, накладываемых на допустимые толщины слоя подложки, слоя припоя, на размеры и плотность распределения одиночных секций истока, затвора и стока в различных вариантах конструкций транзисторов на основе pHEMT и

mHEMT гетероструктур при различных величинах удельной мощности локальных источников тепла.

23. Результаты расчета распределений температуры демонстрируют, что существенное увеличение выходной мощности в DA-DpHEMT транзисторах при стандартных способах отвода тепла ведет к их перегреву даже при сравнительно малой длине секций транзистора, равной 50 мкм. Проблема устранения этого перегрева может быть решена при помощи формирования дополнительного слоя хорошо проводящего тепло диэлектрического покрытия, нанесенного на поверхность транзистора. В качестве такого покрытия предлагается использовать алмазоподобное покрытие, формируемое методом плазмохимического осаждения при низкой температуре. Согласно проведенным расчетам, при минимальном дополнении в технологию транзисторов и без дополнительных мер по улучшению теплопроводности подложки, в зависимости от толщины покрытия, конструкции транзистора и режима его работы, величина максимального перегрева (относительно температуры корпуса) может быть уменьшена от двух до пяти раз.

ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ДОНОРНО – АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

3.1. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ DA-DpHEMT ТРАНЗИСТОРОВ В СРАВНЕНИИ С ТЕХНОЛОГИЕЙ DpHEMT ТРАНЗИСТОРОВ

Транзисторы в DA-DpHEMT исполнении без микрополосковых делителя входной СВЧ мощности и сумматора выходной СВЧ мощности нуждаются в необходимости проведения нетрадиционной для DpHEMT транзисторов операции – операции химического или плазмохимического травления специальных канавок под омические контакты (в канавках нужно создать наклонные стенки без щелей и загибов в области выхода слоя канала). Эта, дополнительная для таких транзисторов операция необходима из-за наличия в структуре верхнего акцепторного слоя, мешающего получить хорошие омические контакты истока и стока традиционным способом (без канавки), при котором, как показала практика, получаются повышенные до 2,5 вольт напряжения насыщения выходных ВАХ транзистора. Перед формированием затвора, в затворном промежутке между истоком и стоком традиционно проводится локальное удаление $n^+ - GaAs$ и $n^- - GaAs$ - контактных слоев, улучшающих омические контакты, однако важно их удаление проводить плазмохимическим методом – с прецизионной остановкой травления на верхней поверхности нижележащего слоя $n^- - Al_{0,25}Ga_{0,75}As$, (но без внесения дефектов в этот слой!). Для хорошей воспроизводимости характеристик транзисторов при этом важно минимизировать возможное уменьшение толщины слоя $n^- - Al_{0,25}Ga_{0,75}As$. Из-за недостаточной селективности химического травления GaAs по отношению к травлению слоя $n^- - Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ использование химических методов травления $n^+ - GaAs$ и $n^- - GaAs$ - слоев нежелательно. Перед формированием элементов конструкции транзистора (это слои Si_3N_4 , металлизация контакта Шоттки, металлизация омических контактов и т.п.) важно проводить удаление собственного окисла с поверхности полупроводника, на

которой формируется элемент. В частности, перед нанесением металлизации контакта Шоттки необходимо удаление собственного окисла с поверхности слоя $n^- - Al_{0,25}Ga_{0,75}As$, но без введения дефектов в этот слой. Учитываемое уменьшение толщины слоя $n^- - Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ в области удаления собственного окисла (это размеры 4-6 нм и 2-3 нм) и характерные особенности конструкции Γ -затвора транзисторов на основе DA-DpHEMT структур, показаны на рисунке 3-1.

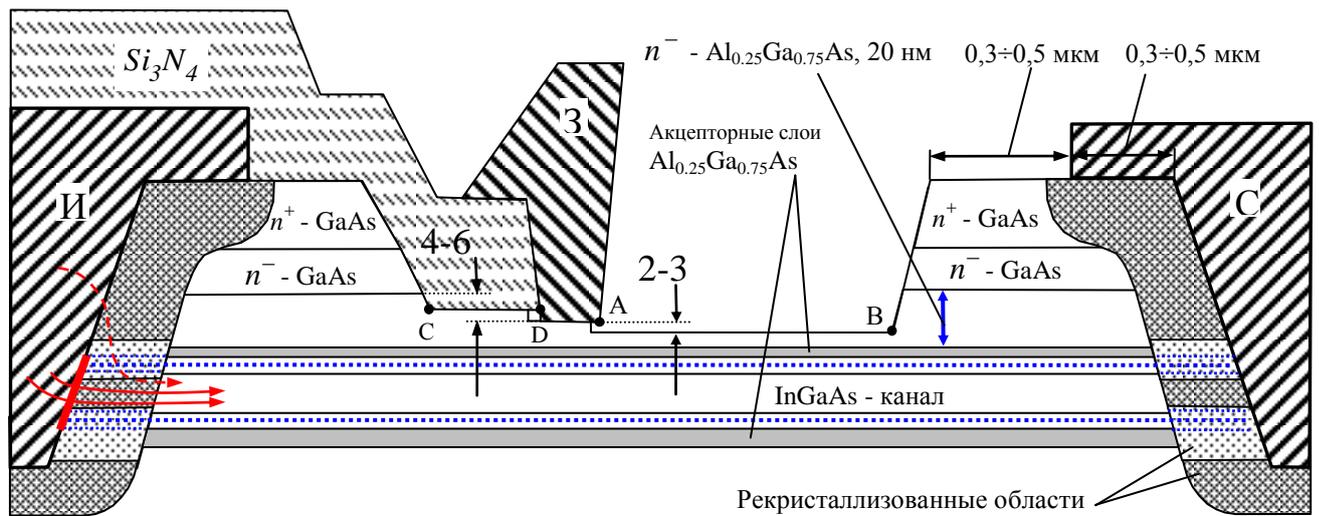


Рис. 3-1. Сечение DA-DpHEMT транзистора. Защитный слой Si_3N_4 , покрывающий участок АВ и всю поверхность транзистора, не показан. Показаны продольные размеры, характерные для СВЧ транзисторов X – диапазона частот.

На рисунке 3-1 размеры 4-6 нм и 2-3 нм есть размеры удаленных слоев собственного окисла на $n^- - Al_{0,25}Ga_{0,75}As$. Линии, показанные синим пунктиром, показывают расположения верхнего и нижнего $\delta:Si$ слоев. Красные стрелки показывают основное направление потока электронов из металлизации истока непосредственно в слой $InGaAs$ канала. Красная штриховая стрелка показывает направление дополнительного потока электронов из металлизации истока, который протекает над потенциальным барьером, сформированным верхним слоем акцепторов в рекристаллизованных областях.

Омические контакты истока и стока.

Если транзистор не содержит в своем составе делитель входной СВЧ мощности и сумматор выходной СВЧ мощности, то особенность DA-DpHEMT гетероструктуры в виде акцепторных слоев заставляет проводить формирование омических контактов истока и стока в специально сформированных для этого канавках. При формировании канавок омических контактов важно обеспечить наличие наклона у боковых стенок этих канавок. Наклон боковых стенок позволяет при напылении Au:Ge:Ni - металлизации омического контакта обеспечить покрытие металлом боковой стенки канавки омического контакта и, что принципиально важно, слоя InGaAs канала, выходящего на боковую стенку (смотри рисунок 3-1). При этом важно, чтобы форма поверхности боковых стенок не имела впадин в области слоя канала и обеспечивала практическую возможность напыления металла на поверхность слоя InGaAs канала, выходящую на боковую стенку.

В результате применения этого конструктивного решения, после вжигания металлизации происходит формирование Au:Ge:Ni омического контакта непосредственно к слою InGaAs канала. При таком контакте основной поток электронов (сплошные красные стрелки) из металлизации истока проходит непосредственно в слой канала через площадку, показанную на рисунке 3-1 жирной красной линией, что и обеспечивает омический вид ВАХ контакта. Возможный дополнительный поток электронов через потенциальный барьер, формируемый слоем верхних акцепторов в рекристаллизованной области, показан на рисунке 3-1 пунктирной красной стрелкой. Этот дополнительный поток дает нелинейный вклад в ВАХ контакта, нарушая ее омический вид. Очевидно, что без омического контакта непосредственно к слою InGaAs канала, потенциальный барьер, формируемый слоем верхних акцепторов в рекристаллизованной области омических контактов не позволяет получить хороший омический контакт – контакт приобретает нелинейную ВАХ с повышенным переходным сопротивлением, что подтвердилось на практике. Важно подчеркнуть, что в

рекристаллизованных областях в процессе вжигания контактов не происходит «перемешивания» доноров и акцепторов. Поэтому, несмотря на избыточность легирования структуры донорами (по отношению к уровню легирования акцепторами) обычное, т.е. без канавки, формирование контактов не позволяет получать хорошие линейные контакты с малым удельным сопротивлением. Конечно, при вжигании контактов в рекристаллизованной области происходит расплывание профиля акцепторов (светло-серые области на рисунке 3-1) и профиля доноров (синие пунктиры на рисунке 3-1), но области, содержащие преимущественно акцепторы верхнего слоя сохраняются и портят контакты, придавая их ВАХ нелинейный вид с повышенным переходным сопротивлением.

Таким образом, получение линейных ВАХ омических контактов в транзисторах на основе DA-DpHEMT структур можно обеспечить при формировании контактов с помощью специальных канавок, на поверхности боковых стенок которых имеется выход слоя InGaAs канала по всей его толщине.

Особенности формирования канавок для омических контактов.

Первые эксперименты по формированию канавок проводились путем их травления в перекисно-щелочном травителе. Результат оказался не очень хорошим – периодически получались контакты с видимой нелинейностью ВАХ и повышенным переходным сопротивлением. Причина этого отрицательного результата заключалась в следующем.

Скорость травления слоя канала $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ при выбранном содержании индия в составе слоя канала ($y=0,165$) заметно больше скорости травления акцепторных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0,25$) в щелочно-перекисном травителе. В результате этого соотношения скоростей травления, на боковых стенках канавки область выхода слоя $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ оказывается существенно заглубленной в эти стенки. Таким образом, форма боковых стенок канавок для омических контактов получается с большой впадиной в области выхода слоя $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ канала.

Следствие образования большой впадины в области слоя $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ – канала следующее. Желаемого нанесения Au:Ge:Ni металлизации на слой $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$

канала не происходит (срабатывает теневой эффект), поэтому в таком омическом контакте протекание тока в основном происходит только через потенциальный барьер верхнего акцепторного слоя в рекристаллизованной области, что и дает нелинейность ВАХ омических контактов. Конечно, в случае использования достаточно толстых слоев металлизации Au:Ge при вжигании возможно ее затекание во впадину на боковой стенке, но формированию хорошего омического контакта к слою $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ мешает собственный окисел на поверхности этого слоя. Граница раздела этого окисла и слоя $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ имеет большую плотность поверхностных состояний, заряжаемых отрицательно электронами, перешедшими из объема слоя n^+ - $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$, формируемого в результате вжигания. Очевидно, этот процесс зарядки поверхностных состояний этой границы раздела приводит к уменьшению концентрации электронов в рекристаллизованном слое омического контакта n^+ - $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ и к увеличению его сопротивления, поэтому нужны специальные меры для удаления собственного окисла с поверхности слоя $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$.

Возможно, что напыление достаточно толстого слоя Au:Ge:Ni с последующим вжиганием в среде водорода позволит обеспечить не только затекание металлизации Au:Ge:Ni во впадину, но и разложение собственного окисла, однако такое решение требует применения специфичного водородного технологического оборудования и мер повышенной безопасности при работе с водородом.

Учитывая эти особенности, для получения плоских боковых стенок с выходом слоя канала и для обеспечения возможности напыления металлизации Au:Ge:Ni на этот слой (с сопутствующим распылением собственного окисла на боковых стенках), при формировании канавок для омических контактов применялось плазмохимическое травление (ПХТ). Канавки получились с относительно плоскими боковыми стенками, но с довольно малым отклонением от вертикали, угол наклона боковых стенок составил примерно 25 градусов по отношению к нормали к поверхности структуры. Несмотря на малую величину этого угла, при напылении металлизации на основе Au:Ge удалось осуществить

напыление металлизации непосредственно на слой $In_yGa_{1-y}As$ канала, в результате после вжигания контактов были получены линейные ВАХ с малым переходным сопротивлением – явный успех! При ПХТ глубина канавки для омических контактов задавалась такой, чтобы дно канавки располагалось в подложке, или, по крайней мере, ниже нижнего акцепторного слоя, что хорошо видно на рисунке 3-2 (на практике травление гетероструктуры проводилось на глубину 0,28 мкм).

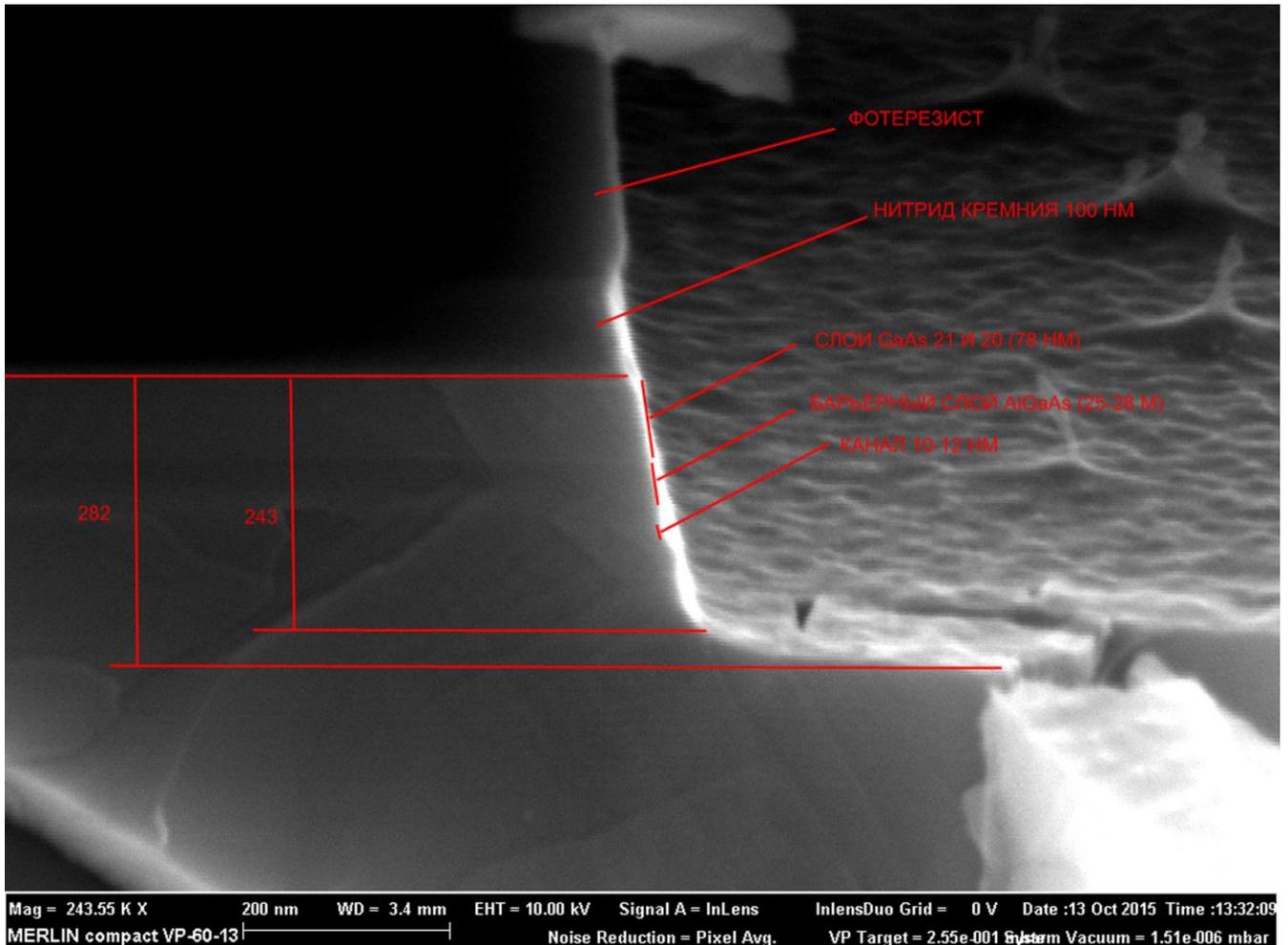


Рис. 3-2. Боковая стенка и дно канавки для омического контакта, сформированной методом ПХТ.

На рисунке 3-2 хорошо видно отсутствие впадины в зоне выхода слоя $In_yGa_{1-y}As$ канала на боковую стенку канавки, что обеспечивает возможность формирования слоя омического контакта непосредственно к $In_yGa_{1-y}As$ каналу.

Кроме этого, для формирования канавок оказалось возможным использовать химический травитель другого состава, который позволил получать канавки или

меза - структуры (в которых размещаются секции транзистора) с относительно плоскими стенками, имеющими большой наклон (примерно 60 градусов по отношению к нормали к поверхности гетероструктуры) при отсутствии глубоких впадин. Типичный вид сверху на меза - структуру показан на рисунке 3-3.

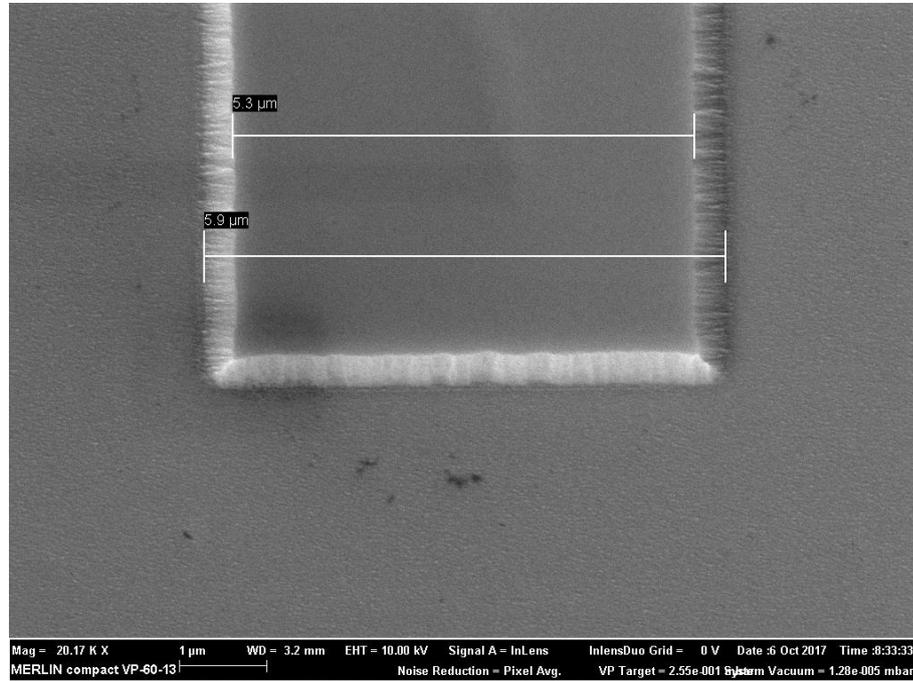


Рис. 3-3. Вид сверху на меза - структуру с наклонными стенками.

Типичная конструкция меза - структуры, показанная на рисунке 3-3, имеет следующие размеры. Размер основания мезы: 5,9-6,0 мкм, размер вершины мезы: 5,2-5,3 мкм при размере в шаблоне 6,5 мкм, высота мезы: 0,16 мкм.

После вжигания контактов, сформированных в канавках, изготавливаемых методом ПХТ (смотри рисунок 3-2) и методом жидкостного травления (смотри рисунок 3-3), были получены линейные ВАХ с малым переходным сопротивлением (напряжение насыщения на выходных ВАХ транзистора составили 1,0 – 1,5 В).

Таким образом, формирование канавок под омические контакты с плоскими и наклонными стенками, можно проводить методом ПХТ и методом жидкостного травления. Далее проводится напыление металлизации на слой InGaAs канала при сопутствующем или отдельном удалении собственного окисла со слоя InGaAs.

Удаление слоев омических контактов n^+ -GaAs и n^- -GaAs в промежутке между истоком и стоком.

Типичный вариант конструкции и технологии DA-DpHEMT транзисторов предусматривает удаление контактных слоев в области формирования затвора и вскрытие верхней поверхности слоя n^- -Al_{0,25}Ga_{0,75}As (этот слой имеет характерную толщину, равную 20 нм, смотри рисунок 3-1) методом ПХТ.

Для обеспечения стабильности технологического процесса, хорошей воспроизводимости параметров транзисторов (особенно в составе микросхем) и для повышения надежности приборов, последующее жидкостное травление слоя n^- -Al_{0,25}Ga_{0,75}As (с исходной толщиной 20 нм) с целью удаления части этого слоя, в которую ввелись дефекты на стадии ПХТ, крайне нежелательно.

Для обеспечения отсутствия дефектов в слое n^- -Al_{0,25}Ga_{0,75}As после проведения ПХТ контактных слоев n^+ -GaAs и n^- -GaAs необходимо использовать такой режим ПХТ, в котором при приближении к окончанию процесса травления слоя n^- -GaAs энергия ионов уменьшается до минимально возможной величины. На практике был опробован такой режим, при котором рабочее напряжение уменьшалось до 40 вольт. При рабочем напряжении, равном 40 вольт, ионы способны вызвать дефекты смещения в кристаллической решетке не более чем в 3 монослоях. Эти три дефектных монослоя автоматически устраняются на этапах удаления собственного окисла, поэтому они не оказывают влияния на работу транзистора. Образцы транзисторов, изготовленных таким образом, показали высокое пробивное напряжение «исток – сток», равное 18 вольт при размере АВ (смотри рисунок 3-1), равном 0,6÷0,7 мкм, что доказывает отсутствие дефектов в оставшейся части слоя n^- -Al_{0,25}Ga_{0,75}As, т.е. продемонстрировано, что такая ПХТ технология успешно работает без последующего химического травления!

Метод ПХТ позволил избежать включения AlAs стоп-слоя на поверхности слоя n^- -Al_{0,25}Ga_{0,75}As. Стоп-слой необходим при использовании жидкостного

химического травления контактных слоев для гарантированной остановки процесса их травления с сохранением заданной в структуре толщины слоя $n^- - Al_{0,25}Ga_{0,75}As$, далее стоп-слой удаляется в селективном травителе. Однако, присутствие AlAs стоп-слоя под контактными слоями сильно увеличивает переходное сопротивление омических контактов. В свою очередь, процесс ПХТ контактных слоев автоматически останавливается после удаления контактных слоев и вскрытия поверхности слоя $n^- - Al_{0,25}Ga_{0,75}As$. Таким образом, возможные изменения от процесса к процессу толщины слоя $n^- - Al_{0,25}Ga_{0,75}As$, оставшейся после удаления собственного окисла, обусловлены только сравнительно малыми вариациями толщины собственного окисла, что существенно повышает воспроизводимость характеристик транзисторов. Исходная толщина слоя $n^- - Al_{0,25}Ga_{0,75}As$, исходно задаваемая равной 20 нм, возможно, несколько велика для получения максимально большого коэффициента усиления (даже с учетом последующего удаления собственного окисла). Такая исходная толщина слоя $n^- - Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ потенциально обеспечивает максимум удельной выходной СВЧ мощности – ожидается получение $2 \div 2,5$ Вт/мм на частоте 10 ГГц, возможно, при коэффициенте усиления не более 10 дБ. Ожидается, что на частоте 10 ГГц в DA-DrHEMT транзисторах можно получить величину выходной мощности $2 \div 2,5$ Вт/мм при коэффициенте усиления $10 \div 15$ дБ.

Решение заключается в уменьшении толщины слоя $n^- - Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ на стадии выращивания структуры, но его важно проводить при одновременном уменьшении толщины верхнего акцепторного слоя и i -слоя в верхней $p-i-(\delta:Si)$ структуре с сопутствующим увеличением (для сохранения хорошей высоты верхнего локализирующего барьера) уровней легирования донорами и акцепторами. Однако, такое улучшение можно верно провести (задать оптимальные толщины слоев и уровни легирования) только после получения

результатов на структурах с исходной толщиной слоя $n^- - Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ равной 20 нм при оптимальной толщине GaAs матриц.

Удаление собственного окисла.

Практически всегда эта операция является обязательной. Важно избежать наличия весьма нестабильного собственного окисла на участках поверхностей АВ, CD, AD, показанных на рисунке 3-1, это способствует увеличению пробивных напряжений приборов, уменьшает НЧ шумы, повышает надежность. На рисунке 3-1 показаны части слоя $n^- - Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ с толщинами 2-3 нм и 4-6 нм, которые удалены в процессе снятия собственного окисла этого слоя. Это участки поверхностей АВ, CD, AD. Предполагается, что при однократном снятии собственного окисла удаляется слой материала, толщиной 2 – 3 нм. Одним из хороших способов удаления собственного окисла представляется его удаление непосредственно в камере установки, в которой наносится слой Si_3N_4 (на участках CD, АВ рисунок 3-1) и в камере установки для напыления металлизации затвора, например, методом обработки в «мягкой» плазме азота. Традиционное и давно известное «освежение» поверхности в жидких средах не позволяет полностью удалить собственный окисел перед формированием слоя Si_3N_4 , поскольку перенос пластин в другую установку, как правило, происходит через воздушную атмосферу. Однако, при последующем формировании контакта Шоттки, напыление металлизации затвора позволяет устранить влияние окисла - на поверхности AD он частично распыляется, а оставшаяся часть собственного окисла растворяется в слое титана.

Эксперимент показал, что, скорее всего, при формировании слоев Si_3N_4 собственный окисел достаточно хорошо удаляется без специального предварительного его удаления в мягкой плазме, что доказывается хорошими пробивными напряжениями «затвор – сток» (пробивное напряжение «затвор – сток» получилось равным 18 вольт при размере АВ на рисунке 3-1 равном $0,6 \pm 0,7$ мкм).

Уменьшение токов стока в результате уменьшения толщины слоя $n^- - Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ при удалении собственного окисла на поверхности «АВ» действительно происходит в безакцепторных транзисторах, но в DA-DpHEMT этот эффект уменьшения тока стока существенно ослаблен, причем его можно вообще ликвидировать еще на этапе выращивания структур путем увеличения уровня легирования верхними донорами. При высотах верхнего локализирующего барьера в DA-DpHEMT более 0,8 эВ возможен даже обратный эффект – увеличение концентрации электронов в канале при удалении собственного окисла.

Таким образом, было показано, что применительно к DA-DpHEMT сопутствующее удаление собственного окисла в процессе осаждения слоев Si_3N_4 дает очень хорошие (на уровне лучших мировых) результаты по пробивным напряжениям «затвор – сток». Собственный окисел под основанием контактом Шоттки желательно удалять методом обработки в мягкой плазме, например, в плазме азота. Эта операция достаточно затруднительна для затворов в Г – исполнении, особенно при больших толщинах слоя Si_3N_4 и при малой длине основания затвора.

В этом плане затвор в Г – исполнении обладает важным преимуществом: технология его изготовления не требует мягкой плазменной очистки поверхности полупроводника в узком и глубоком окне (что достаточно сложно), сформированном в слое диэлектрика. Для надежного удаления собственного окисла под основанием затвора желательно использование в металлизации контакта Шоттки тонкого (с толщиной, примерно равной 10-15 нм) нижнего слоя из титана, в котором растворятся остатки окисла.

Толщина подложки транзисторов на основе DA-DpHEMT структур.

В таких транзисторах при подаче прямого смещения на затвор достигаются большие величины удельного тока стока, и большие величины удельной выходной СВЧ мощности. Для обеспечения достаточно мягкого теплового режима работы транзистора толщина его подложки должна быть уменьшена до

достаточно малой величины. Проведенные тепловые расчеты показали, что в транзисторах такого типа важно провести уменьшение толщины подложки до величин 25 – 30 мкм. Эта мера позволит сохранить в процессе работы транзистора величину его максимальной температуры в допустимых пределах. Для транзисторов в составе МИС уменьшение толщины подложки до столь малых величин часто становится невозможным по причине поломки пластин, в этом случае используется или увеличенная толщина подложки (до 100 мкм) или увеличенная толщина сохраняется в области реза (т.е. вводятся ребра жесткости, удаляемые при резке алмазными дисками). Для обеспечения приемлемых по величине максимальных температур в транзисторе, вместе с этим решением (или вместо него) также можно использовать понижение плотности упаковки секций транзистора и уменьшение ширины каждой одиночной секции истока, затвора и стока.

Соотношения величин размеров Г – затвора.

Представляется оптимальным использовать достаточно большую толщину слоя Si_3N_4 , показанного на рисунке 3-1. Для того, чтобы основную управляющую роль играли внешние заряды, расположенные только на основании затвора, желательно обеспечить высоту ножки затвора, превышающую размер напуска металла шляпки затвора на слой Si_3N_4 . Эта мера направлена на дополнительное уменьшение эффекта обеднения канала под шляпкой затвора (в направлении стока) при протекании потока электронов в сток. Для увеличения коэффициента усиления по мощности важно, чтобы усиление обеднения канала электронами в направлении стока было локализовано не только под основанием затвора. Эта мера также дает увеличение быстродействия и токов стока при различных потенциалах на затворе. В этом плане затвор с трапециевидным (или с треугольным) сечением является менее хорошим, чем Г – затвор, при этом одиночная секция затвора с трапециевидным сечением имеет существенно большее сопротивление в направлении ширины секции затвора, что плохо

сказывается на эффективности управления проводимостью канала по всей площади сечения канала.

Поэтому для обеспечения хорошей управляемости проводимостью канала в каждом его поперечном сечении, вынужденно приходится использовать либо одиночные секции затвора с трапециевидным сечением, имеющие относительно малую ширину, либо, что гораздо эффективнее, использовать Г – затворы с достаточно большой высотой ножки и малым напуском металлизации на слой Si_3N_4 .

Увеличенная высота ножки в Г – затворе компенсирует отсутствие напуска металлизации на слой диэлектрика в направлении стока, (что имеет место в Т - затворах) и позволяет обеспечить в Г – затворах продольное сопротивление секции как минимум, не хуже, чем в Т – затворах.

3.2 СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ DA-DpHEMT И DpHEMT ТРАНЗИСТОРОВ.

Из приведенного выше описания особенностей технологии DA-DpHEMT транзистора следует, что эти особенности полностью используются и в технологии DpHEMT транзисторов. Возможное исключение составляет только операция формирования канавки для омических контактов. Действительно, для DpHEMT транзисторов эта операция не требуется, поскольку DpHEMT гетероструктура не содержит акцепторных слоев. По этой причине может сложиться мнение, что технология DpHEMT транзисторов проще, чем технология DA-DpHEMT транзисторов. Для транзисторов, содержащих только одну одиночную секцию затвора, иногда это действительно справедливо. Однако, для мощных полевых СВЧ транзисторов, содержащих в своем составе большое количество одиночных секций истоков, затворов и стоков, возникает принципиальная проблема - проблема синфазной подачи на все секции затворов входной СВЧ мощности. Очевидно, что для мощного СВЧ транзистора принципиально не менее важно обеспечить также и синфазный сбор выходной СВЧ мощности с каждой одиночной секции стока.

В современных конструкциях мощных СВЧ pHEMT транзисторов проблема синфазной подачи входной СВЧ мощности и синфазного сбора выходных СВЧ мощностей решается введением в конструкцию микрополоскового делителя входной мощности и микрополоскового сумматора выходных мощностей. Делитель и сумматор размещаются на поверхности подложки из полуизолирующего GaAs (вне площади мезы, занимаемой транзистором). Очевидно, что боковая стенка мезы для омических контактов истока и стока DA-DpHEMT транзисторов может быть сформирована на стадии вскрытия поверхности подложки для размещения делителя и сумматора. Поэтому мощный СВЧ DA-DpHEMT транзистор в меза - исполнении, содержащий входной делитель и выходной сумматор по сравнению с конструкцией аналогичного DpHEMT транзистора, не требует усложнения технологии, связанного с необходимостью формирования канавок под омические контакты. Омические

контакты к слою канала располагаются на боковых стенках мезы, формируемых одновременно с площадками на подложке для делителя и сумматора (вне площади, занимаемой мезой на рисунке 3-3).

3.3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ DA-DpHEMT ТРАНЗИСТОРОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для проверки эффективности применения донорно-акцепторного легирования для построения высоких потенциальных барьеров, усиливающих локализацию горячих электронов в слое канала гетероструктуры применительно к мощным СВЧ транзисторам, в ИФП СО РАН были выращены экспериментальные образцы AlGaAs-InGaAs-GaAs DA-DpHEMT гетероструктур, содержащие слои с характеристиками, представленными в таблице 18. Выращивание структур проводилось методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке типа Comrast 21 (Рибер, Франция). Экспериментальные образцы DA-DpHEMT структур выращивались при избыточном легировании кремнием как верхних, так и нижних донорных δ :Si слоев по отношению к соответствующим верхним и нижним акцепторным слоям p^+ -Al_xGa_{1-x}As.

В соответствии с измерениями эффекта Холла DA-DpHEMT структуры с параметрами, приведенными ниже в таблице 18, при $T = 300$ К продемонстрировали холловскую подвижность электронов $\mu = 5300$ см²/(В·с) при их поверхностной плотности $n_s = 4 \cdot 10^{12}$ см⁻².

Таблица 18. Параметры слоев DA-DpHEMT гетероструктуры.

№ слоя	Слой гетероструктуры. Назначение.	Состав. x - для Al, y - для In.	Толщина	Уровень легирования
0	Подложка из полуизолирующего GaAs (ориентация (100))	-	600 мкм	SI, (WT)
1	Буферный слой GaAs	-	400 нм	Не легируется
2	Сверхрешетка: Al _x Ga _{1-x} As 6нм / GaAs 5нм	0,25/-	-	Не легируется, 12 слоев
3	Барьерный слой Al _x Ga _{1-x} As	0,25	100 нм	Не легируется
4	Барьерный слой p ⁺ -Al _x Ga _{1-x} As	0,25	15 нм	4·10 ¹⁸ см ⁻³
5	Барьерный слой Al _x Ga _{1-x} As	0,25	5 нм	Не легируется
6	Стенка GaAs матрицы		0,5 нм	Не легируется
7	Нижний δ:Si слой	0,25	-	(7,7÷8,2)·10 ¹² см ⁻²
8	Стенка GaAs матрицы		0,5 нм	Не легируется
9	Спейсер i-Al _x Ga _{1-x} As	0,25	3 нм	Не легируется
10	Сглаживающий слой i-GaAs	-	3 нм	Не легируется
11	Канал In _y Ga _{1-y} As	0,165	14 нм	Не легируется
12	Сглаживающий слой i-GaAs	-	1,5 нм	Не легируется
13	Спейсер i-Al _x Ga _{1-x} As	0,25	3 нм	Не легируется
14	Стенка GaAs матрицы		0,5 нм	Не легируется
15	Верхний δ:Si слой	0,25	-	(7,0÷7,5)·10 ¹² см ⁻²
16	Стенка GaAs матрицы		0,5 нм	Не легируется
17	Барьерный слой i-Al _x Ga _{1-x} As	0,25	7 нм	Не легируется
18	Барьерный слой p ⁺ -Al _x Ga _{1-x} As	0,25	8 нм	5,0·10 ¹⁸ см ⁻³
19	Барьерный слой i-Al _x Ga _{1-x} As	0,25	6 нм	Не легируется
20	Стоп - слой i-Al _x Ga _{1-x} As	0,86÷0,9	3 нм	Не легируется
21	Контактный слой n ⁻ GaAs	-	27 нм	Не легируется
22	Контактный слой n ⁺ GaAs	-	52 нм	4·10 ¹⁸ см ⁻³

На основе гетероструктур с параметрами, приведенными в таблице 18, по методике [234-235] были изготовлены три партии мощных полевых транзисторов со смещенным в сторону истока затвором, имеющим длину основания 0,4 – 0,5 мкм при общей (по всем секциям) ширине затвора, равной 0,8 мм.

Общий вид этих транзисторов показан на рисунке 3-4.

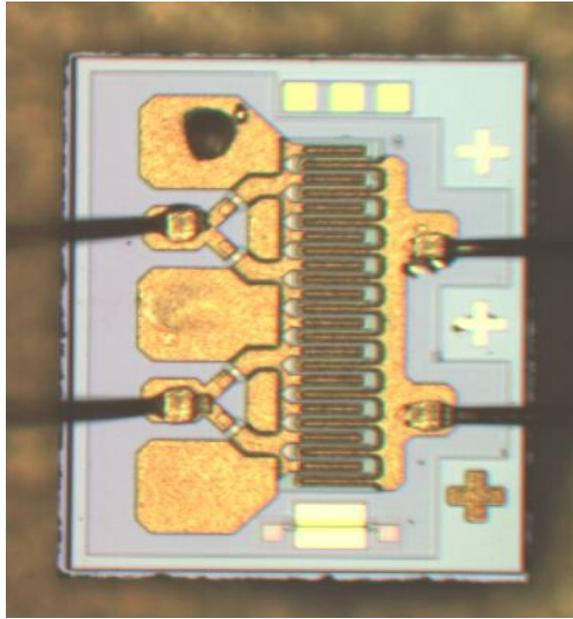


Рис. 3-4. Фотография экспериментального образца транзистора.

Для первых экспериментов использовался транзистор с обычной трапецевидной формой поперечного сечения секций затвора, а не Т-образной или Г-образной формой поперечного сечения секций затвора. Обычные DpHEMT транзисторы, изготовленные в варианте конструкции, показанной на рисунке 3-4, на частоте 10 ГГц демонстрировали удельную выходную СВЧ мощность менее 1 Вт/мм (обычно $0,8 \div 0,9$ Вт/мм). Удельную выходную СВЧ мощность, равную 1 Вт/мм демонстрировали лишь транзисторы с Г-образной формой поперечного сечения секций затвора при эффективной длине основания затвора около 0,15 мкм, однако необходимо учитывать, что сопротивление металлизации такого затвора в несколько раз ниже, чем у затвора с трапецевидной формой поперечного сечения секций [153].

Все образцы транзисторов показали достаточно малые токи утечки по подложке и “гладкие” ВАХ в области отсечки, что свидетельствует о том, что ток горячих электронов в широкозонном материале со стороны подложки – мал. Для доказательства важности формирования омических контактов истока и стока DA-DpHEMT транзисторов в специальных канавках (или на боковых стенках мез), были изготовлены образцы DA-DpHEMT транзисторов без канавок для омических контактов. В таблице 19 представлены типичные значения

сопротивлений истока, напряжения насыщения на стоке, и пробивные напряжения для транзисторов в DA-DpHEMT исполнении, но без канавок для омических контактов и для транзисторов, изготовленных на традиционных структурах в DpHEMT исполнении (тоже без канавок для омических контактов).

Таблица 19. Сравнение сопротивлений истока и стока в DA-DpHEMT и в DpHEMT транзисторах.

Конструкция транзистора		Сопротивления истока и стока [Ом]	Напряжение насыщения [В]	Пробивное напряжение «исток-сток» закрытого транзистора [В]
DpHEMT	4 партии	0,9	1,5	15,5÷21
DA-DpHEMT	Партия 1	1,5	2	13,5÷15
DA-DpHEMT	Партия 2	1,5	2,2	14,5÷16
DA-DpHEMT	Партия 3	2	2,5	16÷18

Из результатов, приведенных в таблице 19 видно, что конструкция и технология транзисторов на DA-DpHEMT гетероструктурах действительно требует введения канавок под омические контакты и принятия специальных мер по увеличению пробивного напряжения. Партии 1 и 2 DA-DpHEMT транзисторов имеют не слишком высокие пробивные напряжения. В партии 3 проведено увеличение на 0,2 мкм расстояния между стоковым краем основания затвора и стоковым краем контактных слоев $n^+ - GaAs$ и $n^- - GaAs$ (смотри рисунок 3-1, размер АВ), что привело к увеличению пробивного напряжения.

Сопротивление истока в партиях 1 и 2 в полтора раза, а в партии 3 более чем в два раза, превышает сопротивление истока в транзисторах на основе традиционных DpHEMT гетероструктур, изготовленных в СПб АУ НОЦНТ РАН. Этот результат вполне понятен – потенциальный барьер, сформированный верхним акцепторным слоем в рекристаллизованных областях, препятствует потоку электронов из шины истока в InGaAs канал и из канала в стоковую шину.

Таким образом, получено экспериментальное доказательство необходимости введения специальных канавок в конструкцию омических контактов истока и стока DA-DpHEMT транзисторов.

В образцах из партий 1, 2, 3 заметно выше напряжение, при котором происходит насыщение максимального тока стока транзистора (смотри таблицу 19).

На рисунке 3-5 приведены типичные зависимости тока стока и крутизны от напряжения на затворе при напряжении на стоке, соответствующем выходу на максимум тока стока на участке насыщения выходных ВАХ для традиционного DpHEMT транзистора. На рисунке 3-6 приведены аналогичные зависимости для разработанного DA-DpHEMT транзистора на гетероструктуре с локализирующими потенциальными барьерами. На этих же рисунках приведены расчетные значения тока стока и «внутренней» крутизны транзистора, рассчитанные при сопротивлениях истока и стока, равных нулю.

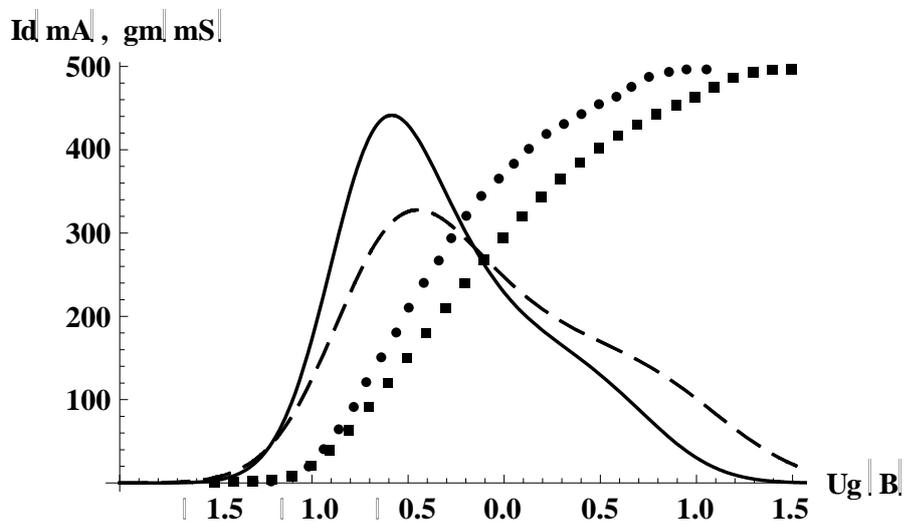


Рис. 3-5. Измеренные ток стока (■ ■ ■) и крутизна (— — —), а также ток стока (● ● ●) и «внутренняя» крутизна (——), рассчитанные при сопротивлениях истока и стока, равных нулю, в зависимости от напряжения на затворе для DpHEMT транзистора.

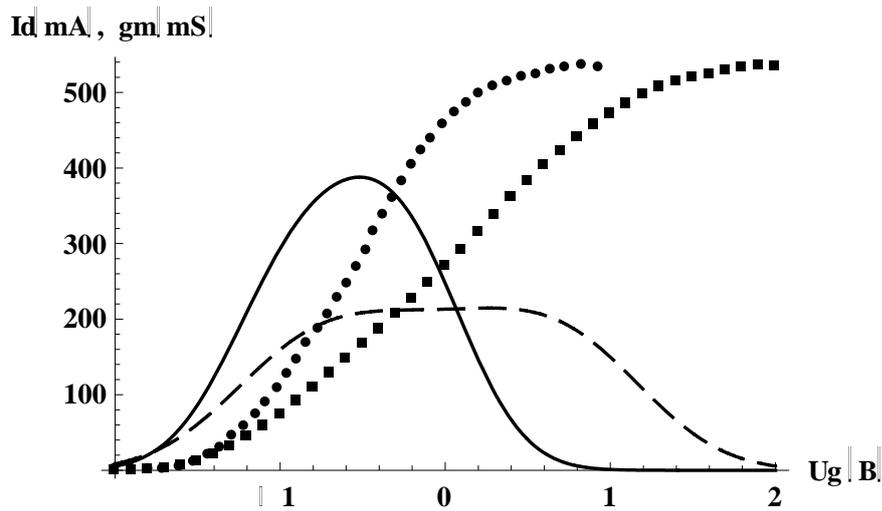


Рис. 3-6. Измеренные ток стока (■ ■ ■) и крутизна (— — —), а также ток стока (• • •) и «внутренняя» крутизна (————), рассчитанные при сопротивлениях истока и стока, равных нулю, в зависимости от напряжения на затворе для DA-DpHEMT транзистора (без канавок для омических контактов).

Из результатов, приведенных на рисунках 3-5 и 3-6 видно, что зависимость крутизны $g_m(U_g)$ от напряжения на затворе в DA-DpHEMT транзисторах практически симметрична относительно точки максимума, ее величина заметно меньше, чем у DpHEMT транзистора. Видно, что относительное увеличение максимума тока стока на участке насыщения статических выходных ВАХ в DA-DpHEMT транзисторах незначительно: всего 10÷20%. Видно, также, что для DA-DpHEMT транзисторов сопротивления истока недопустимо велики (смотри таблицу 19) – они радикальным образом изменяют вид крутизны, делая ее почти постоянной в широком диапазоне напряжений на затворе.

Для СВЧ измерений транзисторы монтировались в 50-Омные линии и вставлялись в специальную оправку с согласующими трансформаторами на входе и выходе, с помощью которых проводилась настройка прибора на получение максимальной выходной мощности. При измерениях учитывались потери только в переходах и в измерительном тракте, потери в согласующих трансформаторах не учитывались (по оценкам, для транзисторов с шириной затвора более 4 мм они могут составлять до 15 %, для транзисторов с меньшей шириной затвора оценки не проводились). При СВЧ измерениях напряжение на стоке приборов задавалась

в диапазоне величин $8 \div 9$ В. Использование стандартной оценки величины максимально возможной выходной СВЧ мощности по параметрам статических ВАХ показывает, что выходная СВЧ мощность экспериментальных образцов DA-DpHEMT транзисторов достаточно слабо (на $10 \div 20\%$) увеличится по сравнению с традиционными DpHEMT транзисторами. При этом коэффициент полезного действия из-за высокого сопротивления истока в DA-DpHEMT транзисторах будет заметно ниже. Однако результаты эксперимента резко разошлись с этими оценками и предположениями. Типичные результаты измерений на частоте 10 ГГц в непрерывном режиме приведены в таблице 20.

Таблица 20. Параметры рабочей точки (U_d, J_d), задаваемые (P_{ex}) и измеренные СВЧ параметры DA-DpHEMT транзисторов ($P_{вых}, K_P, КПД$).

№ DA-DpHEMT транзистора (из партий 1, 2)	U_d В	I_d мА	$P_{входа}$ мВт	$P_{выхода}$ мВт	K_P Дб	КПД	$P_{вых}/W_g$, Вт/мм
1	8	160	10	135	11,2		
	8	220	150	1040	8,4	50	1,3
	8	230	170	1070	8	49	1,34
	9	160	10	140	11,4		
	9	230	150	1100	8,7	46	1,38
	9	240	170	1140	8,3	45	1,42
2	8	150	10	110	10,4		
	8	210	150	1010	8,3	51	1,26
	8	220	170	1075	8	51	1,34
	9	160	10	100	10		
	9	230	150	1050	8,45	43	1,31
	9	240	170	1150	8,3	45	1,44
3	8	240	170	1090	8,1	48	1,36
	9	225	10	90	9,5		
	9	270	150	1060	8,5	38	1,33
	9	270	170	1140	8,3	40	1,42

Видно, что транзисторы из партий 1 и 2 продемонстрировали в непрерывном режиме максимальную величину удельной выходной мощности более 1,3-1,4 Вт/мм, коэффициент усиления более 8 дБ, КПД около 50% [149,150,236]. DA-DpHEMT транзисторы из партии 3 (таблица 21)

продемонстрировали в непрерывном режиме величину удельной выходной мощности более 1,6 Вт/мм, коэффициент усиления более 9 дБ, КПД около 50%.

Таблица 21. Параметры рабочей точки (U_d, J_d), задаваемые (P_{ex}) и измеренные СВЧ параметры DA-DpHEMT транзисторов ($P_{вых}, K_P, \text{КПД}$).

№ DA-DpHEMT транзистора (из партии 3)	U_d В	I_d мА	$P_{входа}$, мВт	$P_{выхода}$, мВт	K_P , дБ	КПД	$P_{вых}/W_g$, Вт/мм
1	9	210	30	455	11.8	-	-
	8	260	150	1150	8.8	50	1,44
	9	270	150	1280	9,3	46	1,60
2	9	220	30	460	11,8	-	-
	8	245	150	1135	8,8	50.3	1,42
	9	255	150	1300	9.4	50.1	1,63
3	9	240	30	460	11,8	-	-
	8	240	150	1145	8,8	51,8	1,43
	9	245	150	1310	9,4	52,6	1,64

В импульсном режиме измерений (длина импульса $\tau = 10$ мкс, скважность $Q = 4$) на частоте 10 ГГц результаты (таблица 22), полученные на DA-DpHEMT транзисторах из партии 3 выглядят еще более впечатляюще.

Таблица 22. Параметры рабочей точки (U_d, J_d), задаваемые (P_{ex}) и измеренные СВЧ параметры DA-DpHEMT транзисторов ($P_{вых}, K_P, \text{КПД}$).

№ DA-DpHEMT транзистора (из партии 3)	U_d В	I_d мА	$P_{входа}$, мВт	$P_{выхода}$, мВт	K_P , дБ	КПД	$P_{вых}/W_g$, Вт/мм
1	9	250	30	500	12.2	-	-
	8	260	150	1320	9,4	56	1,65
	9	290	150	1420	9,8	46	1,78
2	9	230	30	490	12,1	-	-
	8	260	150	1300	9,4	55.2	1,62
	9	275	150	1430	9.8	51.7	1,79
3	9	250	30	505	12,2	-	-
	8	265	150	1310	8,9	54,7	1,63
	9	285	150	1450	9,8	50,7	1,81

3.4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Поведенные экспериментальные исследования образцов мощных СВЧ DA-DpHEMT транзисторов продемонстрировали практически двукратный рост коэффициента усиления по сравнению с традиционными DpHEMT транзисторами и существенное увеличение выходной СВЧ мощности.

Возникает вопрос, какие из возможных преимуществ новых структур, так заметно изменили характеристики приборов в лучшую сторону? Уменьшение влияния параллельных каналов проводимости (проводимость по GaAs матрицам, по AlGaAs спейсерам и по GaAs сглаживающим слоям) при увеличенной плотности электронов в InGaAs канале должно приводить к росту максимального тока стока при прямом смещении на затворе транзистора и, как следует из стандартных оценок [237], к пропорциональному росту выходной мощности. Но в этом плане результаты измерений на эксперименте показали избыточно сильный рост выходной СВЧ мощности в DA-DpHEMT транзисторах по сравнению с DpHEMT транзисторами. Видно (смотри рисунки 3-5, 3-6), что максимальный статический ток стока в транзисторах на DA-DpHEMT структурах превосходит аналогичный ток в обычных DpHEMT транзисторах весьма незначительно (на 10%, максимум на 20%). Интересно отметить, что грубые оценочные расчеты, проведенные в модели [154] (в ней достаточно корректно описывается динамика электронов и поперечный пространственный перенос, но в приближении треугольной квантовой ямы анализируется структура с верхним по отношению к каналу легированием) дают примерно такое же увеличение максимального тока стока: на 10-20%. Однако, вид квантовой ямы DA-DpHEMT структуры (смотри рисунок 2-9) не позволяет использовать треугольное приближение. Кроме этого, в модели [154] не учитывается уменьшение интенсивности рассеяния электронов, вызываемое эффектом размерного квантования.

Зависимость внутренней крутизны от напряжения на затворе для DA-DpHEMT транзисторов оказалась практически симметричной относительно точки

ее максимума, причем положение максимума соответствует половине максимального тока стока в транзисторе. При этом коэффициент усиления и выходная мощность транзисторов на гетероструктурах с локализуемыми потенциальными барьерами почти вдвое выше, чем у DpHEMT с донорным легированием при близких пробивных напряжениях. Важно отметить, что эта близость пробивных напряжений запертых транзисторов, наблюдаемая при измерении ВАХ в квазистатических условиях, может не иметь места при СВЧ изменениях потенциала на стоке. Действительно, при подаче на затвор напряжения, запирающего транзистор, вся часть слоя InGaAs канала между истоковым краем затвора и под частью n^+ - контактного GaAs слоя у стока, оказывается практически полностью обедненной электронами. Такое сильное обеднение является следствием дополнительного обеднения канала в промежутке «затвор – сток», вызванного эффектом экранирования внешнего положительного заряда на стоке. Таким образом, при наличии СВЧ потенциала на стоке лавинный пробой в слое канала развивается в промежутке «затвор – сток» между стоковым краем затвора и под частью n^+ - контактного GaAs слоя у стока (смотри рисунок 3-1). Очень сильные встроенные поля в локализуемых барьерах способствуют быстрому поперечному отводу из слоя канала дырок, рождаемых в процессе лавинного пробоя. Поэтому процесс формирования лавины становится более мягким, т.е. растянутым во времени, (смотри главу 1 в [238]), что способствует задержке нарастания тока лавины во времени при СВЧ нарастании положительного потенциала на стоке. Важно, что в DA-DpHEMT этот перенос дырок существенно усилен как в направлении затвора, так и в направлении подложки. Таким образом, при переходе в начало лавинного пробоя (за счет роста СВЧ компоненты электрического потенциала на стоке), величина критически большого (когда прекращается усиление СВЧ мощности) тока в лавине в DA-DpHEMT транзисторах достигается при больших СВЧ напряжениях между стоком и истоком, чем у DpHEMT транзисторов. Приведенный механизм в принципе позволяет объяснить почти двукратное увеличение выходной СВЧ мощности в DA-DpHEMT транзисторах за счет увеличения на СВЧ напряжения

начала пробоя запертого транзистора в условиях СВЧ нарастания положительного потенциала на стоке. Отметим, что инерционность процесса формирования лавины при СВЧ изменениях напряжения хорошо известна и широко используется на практике, например, в СВЧ лавинно-пролетных диодах.

По отдельности, большинство результатов, наблюдаемых на DA-DpHEMT транзисторах, легко объясняются. В частности, характерное для DA-DpHEMT транзисторов изменение формы зависимости крутизны $g_m(U_g)$ вполне объяснимо: сильная асимметрия этой зависимости может быть связана с интенсивным поперечным пространственным переносом горячих электронов в паразитные каналы проводимости в слоях GaAs матриц, AlGaAs спейсеров и в меньшей степени, в сглаживающих GaAs слоях.

Введение локализующих потенциальных барьеров резко снижает отрицательное влияние поперечного пространственного выноса горячих электронов из слоя канала, что и ведет к исчезновению асимметрии $g_m(U_g)$. Этот же эффект мог бы объяснить и наблюдаемый рост максимального тока стока на участке насыщения выходных ВАХ. При этом влияние размерно-квантовых эффектов представлялось бы незначительным, что само по себе не выглядит очень странным. Однако при таком предположении коэффициент усиления должен вырасти максимум на 20 %, а не почти вдвое. Поэтому можно предположить, что столь сильный рост коэффициента усиления связан с динамическим увеличением тока стока на СВЧ, вызванным усилением размерно-квантовых эффектов, уменьшением интенсивности рассеяния, сопутствующим ростом амплитуды и ширины всплеска во времени дрейфовой скорости. Незначительный рост статического тока стока (всего на 10-20 %) легко связывается с таким же относительным увеличением дрейфовой скорости в конце ее всплеска. Понятно, что учет при анализе причин эффекта только статических характеристик никоим образом не объясняет почти двукратный рост выходной СВЧ мощности, которая при таком увеличении максимального статического тока стока тоже должна вырасти максимум на 20%.

В принципе возможен еще один механизм, объясняющий полезный эффект. В DpHEMT транзисторах при увеличении положительных напряжений на затворе относительно быстро начинается рост входной емкости транзистора и, как следствие, резкое падение коэффициента усиления. В режиме большого сигнала вся область положительных напряжений на затворе выше точки начала быстрого отпираания контакта Шоттки как бы обрезается, транзистор в этой области перестает работать в режиме усиления. Из-за формы потенциального рельефа в барьере Шоттки DA-DpHEMT транзисторов с локализирующими барьерами, прекращение усиления наблюдается при существенно более высоких положительных напряжениях на затворе и соответственно, при больших величинах токах стока. Этот механизм, в принципе, сам по себе может объяснить столь существенную разницу в выходной мощности. Однако измерение S – параметров рассматриваемых транзисторов и восстановление их эквивалентных схем показывает, что резкий рост входной емкости в обычных DpHEMT транзисторах начинается при токах всего на 20% меньших, чем в DA-DpHEMT транзисторах с локализирующими потенциальными барьерами. Отсюда следует, что выходная мощность в DA-DpHEMT должна быть больше всего на 20 %, а не в два раза, по отношению к транзисторам в DpHEMT исполнении.

Приведенные выше результаты, оценки и анализ различных механизмов все-таки позволяют сделать вывод, что введение локализирующих потенциальных барьеров в DA-DpHEMT транзисторы существенно уменьшает отрицательно влияющий на работу поперечный межслоевой перенос горячих электронов из слоя канала. Также в транзисторах DA-DpHEMT исполнения сильно ослабляется влияние паразитных каналов проводимости, а интенсивность рассеяния горячих электронов за счет размерно-квантовых эффектов заметно падает.

Таким образом, выявляются следующие три наиболее вероятных механизма, объясняющие существенное превосходство DA-DpHEMT транзисторов по выходной СВЧ мощности и по коэффициенту усиления на СВЧ.

Первый механизм. В DA-DpHEMT положительный эффект достигается за счет увеличения напряжения лавинного пробоя по отношению к DpHEMT в

условиях динамического формирования на стоке положительного СВЧ потенциала.

Второй механизм. В DA-DpHEMT положительный эффект по отношению к DpHEMT достигается за счет существенного увеличения амплитуды и ширины всплеска дрейфовой скорости, приводящего к существенному увеличению нестационарной величины максимального тока стока.

Третий механизм. В DA-DpHEMT положительный эффект по отношению к DpHEMT достигается за счет специфичной реакции Sh-i-p-i-n - потенциального барьера, определяющего вид потенциального барьера контакта Шоттки, на подачу прямого смещения на затвор – наблюдается увеличение напряжения отпирания контакта Шоттки до величин, равных $1,2 \div 1,6$ вольт. В традиционных DpHEMT транзисторах потенциальный Sh-i-n - барьер контакта Шоттки имеет существенно меньшие величины напряжения отпирания, примерно равные 0,8 В.

Приведенные экспериментальные результаты по сути дела являются начальными результатами из большого объема работ по очень широкой номенклатуре различных типов транзисторных гетероструктур с локализуемыми потенциальными барьерами. Несомненно, большой интерес представляет оценить возможные перспективы развития данного типа приборов как на ближайшее будущее (отработка технологии, изготовление транзисторов с современным затвором), так и на более отдаленную перспективу (совершенствование гетероструктур, поиск новых конструктивных решений).

Экспериментальные образцы DA-DpHEMT транзисторов были разработаны с учетом опыта разработки и применения гетероструктур без локализующих барьеров. Использовались частично оптимизированные толщины слоев и поверхностные плотности электронов в канале, что позволило доказать возможность получения большого полезного физического и приборного эффекта. Можно предположить, что дальнейшая оптимизация структуры и конструкции транзистора позволит усилить полученный результат - увеличить уровень выходной удельной СВЧ мощности до величин более 2 Вт/мм на частоте 10 ГГц.

Как отмечалось выше, экспериментальные результаты были получены для мощных DA-DpHEMT транзисторов в варианте конструкции с трапецевидным затвором, используемом при серийном производстве. Можно ожидать, и это на наш взгляд крайне пессимистическая оценка, что применение Т – образного или Г – образного затвора с длиной основания менее 0,25 мкм (в условиях обеспечения достаточно хорошего отвода тепла) дополнительно увеличит выходную удельную СВЧ мощность, позволит заметно увеличить коэффициент усиления и КПД, а также позволит на частоте 10 ГГц выйти на следующий уровень по параметрам транзисторов:

1. Удельная мощность более 2,5 Вт/мм.
2. Коэффициент усиления в насыщении более 13 дБ.
3. КПД при настройке на максимальную мощность 55 ÷ 60%.

С одной стороны коэффициент усиления 13 дБ для мощного транзистора – избыточный и использование таких приборов может быть затруднено из-за проблем с самовозбуждением. С другой стороны большой коэффициент усиления позволяет ввести в таких приборах полевой электрод [187], который через слой диэлектрика перерывает примерно половину шляпки затвора и часть промежутка «затвор – сток». За счет введения полевого электрода можно заметно увеличить пробивное напряжение «затвор – сток» и, как следствие, увеличить выходную СВЧ мощность. Ранее в X – диапазоне использование полевого электрода было затруднено из-за сопутствующего существенного уменьшения коэффициента усиления. Однако, если приведенные оценки окажутся верны и транзисторы на DA-DpHEMT структурах будут демонстрировать избыток усиления, то за счет введения полевого электрода при потере избыточной части коэффициента усиления можно будет выйти на величину выходной мощности 5 Вт/мм при коэффициенте усиления 8-9 дБ, то есть на уровень параметров транзисторов на основе нитрида галлия. Правда в этом случае остро встанет проблема отвода тепла от активной области прибора, и транзисторы придется изготавливать с подложкой, уменьшенной до толщины не более 25 мкм или искать новые

технические решения, способствующие усилению отвода тепла, например [223,227,228].

Как отмечалось выше, одно из возможных достоинств разработанных гетероструктур – это уменьшение относительной доли горячих электронов, находящихся вне слоя канала, улучшение управления током стока при больших положительных напряжениях на затворе. Данный эффект может иметь важное самостоятельное значение. В частности, введение высокого потенциального барьера для горячих электронов между каналом и буферным слоем, выращенным на подложке, может решить проблемы управляемости GaN транзисторов при нанометровых длинах затворов, и возможно, решить проблемы токов утечки в цифровой технике при переходе к транзисторам с длинами затворов порядка 10 нм.

Элементарные оценки показывают, что улучшение омических контактов в DA-DpHEMT гетероструктурах позволит при непрерывном режиме работы транзистора:

1. Сместить оптимальную рабочую точку на ВАХ с 9 В на 8 В.
2. Увеличить удельную выходную мощность до величин более 1,7 Вт/мм
3. Увеличить КПД в режиме настройки на максимальную выходную мощность до 55 ÷ 60%
4. Увеличить коэффициент усиления в режиме настройки на максимальную выходную мощность до 10 ÷ 10,5 дБ.

Необходимо отметить, что экспериментальные образцы DA-DpHEMT транзисторов были разработаны с учетом опыта разработки и применения гетероструктур без локализирующих барьеров с типичными толщинами слоев и поверхностными плотностями электронов в канале исключительно для выявления возможности проявления ожидаемого полезного физического и приборного эффекта. Поэтому можно предположить, что только оптимизация структуры позволит увеличить уровень выходной удельной СВЧ мощности до 2 Вт/мм.

Еще более перспективным выглядит использование гетероструктур с донорно – акцепторным легированием в миллиметровом диапазоне длин волн. Образцы GaN транзисторов на частоте 40 ГГц демонстрируют малосигнальный коэффициент усиления около 7 дБ при длине затвора 80 нм [239]. Если приведенные выше оценки верны, то в GaN структурах с донорно-акцепторным легированием этот же коэффициент усиления можно будет получить в режиме насыщения выходной мощности при длине затвора, равной 0,25 мкм.

Не менее перспективным выглядит применение данного технического решения в малошумящих транзисторах. Простая, но достаточно грубая оценка [2,240] показывает, что при прочих равных условиях коэффициент шума обратно пропорционален коэффициенту усиления $F_{min} \propto (K_y)^{-1}$, а коэффициент усиления в транзисторах на DA-DpHEMT гетероструктурах почти в 2 раза выше, чем в транзисторах на DpHEMT гетероструктурах. По этой причине в DA-DpHEMT транзисторах можно ожидать соответствующее уменьшение коэффициента шума. Однако подтвердить это предположение может только практическая разработка специальных вариантов конструкции структур с DA – легированием, предназначенных для малошумящих транзисторов и изготовление на их основе экспериментальных образцов.

Как отмечалось выше, одно из возможных достоинств разработанных гетероструктур – это уменьшение относительной доли горячих электронов, находящихся вне слоя канала, улучшение управления током при высоких напряжениях на затворе. Данный эффект может иметь важное самостоятельное значение. В частности, введение высокого потенциального барьера для горячих электронов между каналом и буферным слоем, выращенным на подложке, может решить проблемы управляемости GaN транзисторов при нанометровых длинах основания затвора. Также возможно, что наличие нижнего локализирующего барьера позволит минимизировать межэлементные токи утечки в цифровых микросхемах на основе GaAs транзисторов с длинами затворов порядка 10 нм.

Приведенные выше результаты и оценки, по всей вероятности, позволяют подтвердить вывод [187,241,242] о том, что локализирующие потенциальные барьеры ослабляют поперечный вынос горячих электронов из слоя канала и ослабляют проводимость по слоям, обрамляющим канал. Тем самым заметно уменьшается влияние этих отрицательных факторов, а за счет усиления размерно-квантовых эффектов уменьшается интенсивность рассеяния горячих электронов. Таким образом, в результате использования DA-DpHEMT конструкции происходит существенное улучшение характеристик гетероструктурных транзисторов.

3.5. МОЩНЫЕ DA-DpHEMT ТРАНЗИСТОРЫ С ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ТОЧКОЙ ПРИ НУЛЕВОМ НАПРЯЖЕНИИ НА ЗАТВОРЕ

Часто при использовании в аппаратуре различного назначения к усилителям мощности кроме основных требований (выходная мощность, коэффициент усиления, КПД, полоса рабочих частот) предъявляется большой набор дополнительных требований, плохо совместимых с основными требованиями. К таким дополнительным требованиям могут быть отнесены, например, величины напряжения источников питания, величины токов в цепи затвора и т.д. Практически все мощные полевые транзисторы на основе традиционных DpHEMT гетероструктур с донорным легированием наиболее эффективно работают (то есть демонстрируют максимальные величины выходной мощности, коэффициента усиления и КПД) при задании оптимального напряжения на затворе, которое всегда оказывается отрицательной величиной. В ряде изделий это обстоятельство не имеет практически никакого существенного значения. Однако существует ряд систем (например, некоторые виды АФАР) для которых очень полезна разработка мощных полевых транзисторов, наиболее эффективно работающих при задании напряжения на затворе, равного нулю.

Создать мощный полевой транзистор на основе традиционных AlGaAs-InGaAs-GaAs pHEMT гетероструктур как с объемным (n)-DpHEMT, так и с дельта-легированием донорами (δ :Si)-DpHEMT, эффективно работающий при задании

напряжения на затворе, равном нулю, крайне проблематично. Положение рабочей точки, обеспечивающей получение максимальной СВЧ мощности в нагрузке на выходе усилителя мощности и (или) КПД, в каждом конкретном случае зависит от многих факторов, включающих в себя как особенности самого транзистора, так и особенности цепей согласования и питания.

Однако, из очевидных соображений, связанных с формой сток – затворных ВАХ ДрНЕМТ транзисторов, формируются требования к положению рабочей точки оптимальной по напряжению на затворе, которые приведены ниже.

Для того чтобы транзистор обеспечивал максимальную выходную СВЧ мощность, рабочая точка (по напряжению на затворе) должна быть выбрана так, чтобы при максимальных положительных смещениях на затворе, определяемых амплитудой напряжения входной СВЧ мощности, ток стока был бы максимален, а при максимальных отрицательных смещениях на затворе – транзистор был бы полностью перекрыт [224]. Важное дополнительное условие – при максимальном токе стока в канале транзистора при прямом смещении на затворе, поток электронов из канала в затвор должен быть ещё достаточно мал (иначе СВЧ мощность, выделяемая в нагрузке на выходе транзистора, начинает сильно уменьшаться). Обеспечению малости величины тока затвора в широком диапазоне СВЧ изменения амплитуды напряжения на затворе, сильно мешает термо-полевой разогрев электронов в канале транзистора. Действительно, электроны в канале транзистора в рабочих режимах разогреваются и приобретают дополнительную энергию не менее величины энергии междолинного зазора (в гетероструктурах на основе GaAs равную примерно 0.3 эВ), при этом начало насыщения выходных ВАХ как раз и соответствует началу интенсивных междолинных переходов в канале транзистора. Естественно, в том случае, когда величина потенциального барьера на границе металл - полупроводник становится сравнимой с этой величиной (например, при прямом смещении на затворе), горячие электроны приобретают возможность беспрепятственного перехода в затвор, находящийся под положительным потенциалом. Высота барьера Шоттки в серийных транзисторах на основе GaAs гетероструктур составляет всего около $0,7 \div 1$ эВ,

поэтому разогрев электронов заметно уменьшает эффективную высоту барьера Шоттки. При этом напряжение перекрытия типичных транзисторов составляет величину более 1,5 В даже при малых напряжениях на стоке. В частности, при напряжениях на стоке сравнимых по величине с напряжениям пробоя, напряжение перекрытия обычно увеличивается до величин более 3 В, а для получения максимальной выходной СВЧ мощности транзистор должен перекрываться именно при высоких напряжениях на стоке.

Соотношение величины высоты барьера Шоттки и величины напряжения перекрытия, даже с учетом автосмещения и энергии разрыва зон на границах гетеропереходов, приводит к необходимости подачи постоянного отрицательного напряжения на затвор, обеспечивающего оптимальность выбора рабочей точки – выбора такой точки, в которой обеспечивается максимум выходной мощности. Кроме этого, даже при выборе такой оптимальной (по напряжению на затворе) рабочей точки, подача СВЧ положительного смещения на затвор приводит к интенсивному поперечному переносу горячих электронов из канала в верхний широкозонный слой и, как следствие, к резкому падению подвижности горячих электронов [149]. Это падение подвижности в свою очередь ведет к падению крутизны транзистора и ухудшению управляемости. Поэтому серийные рНЕМТ и ДрНЕМТ транзисторы, как правило, имеют оптимальную рабочую точку при постоянном отрицательном напряжении на затворе и при постоянном токе стока меньшем, чем половина максимального тока стока, при максимальной положительной амплитуде СВЧ смещения на затворе.

Ситуация ухудшается при необходимости такого задания рабочей точки транзистора, в которой обеспечивается достаточно высокий КПД, это приводит к необходимости уменьшения постоянного тока стока в рабочей точке, следствие этого уменьшения – заметное уменьшение максимальной выходной мощности.

Управление положением оптимальной рабочей точки по напряжению на затворе, в которой обеспечивается максимум выходной СВЧ мощности, выделяемой в нагрузке, можно обеспечить, используя в составе транзисторов DA-ДрНЕМТ гетероструктуры с локализуемыми барьерами [149,150]. По сути дела,

набор эпитаксиальных слоев, образующих $i - p^+ - i - (\delta:Si)$ структуру, в которой расположен потенциальный барьер Шоттки и верхний локализирующий барьер, является своеобразным делителем входного напряжения, подаваемого на затвор (смотри рисунок 3-7). Эффект деления напряжения на затворе в слоях этой структуры возникает из-за наличия сильного (порядка $\sim 10^6$ В/см) встроенного электрического поля в высоком верхнем локализирующем барьере и из-за сравнительно малой (по отношению к толщине всей $i - p^+ - i - (\delta:Si)$ структуры) толщины стенки этого барьера. Эти особенности приводят к тому, что подача даже сравнительно большого положительного напряжения на затвор не приводит к полному исчезновению верхнего локализирующего барьера. Похожий эффект наблюдается в диодах с планарно-легированным акцепторами барьером на основе $n^+ - i - (\delta:A) - i - n^+$ гомоэпитаксиальной структуры [243,244]. В принципе, учитывая этот эффект, положение оптимальной рабочей точки в транзисторах на основе такой (DA)-DrHEMT гетероструктуры можно вообще сдвинуть в диапазон положительных напряжений на затворе при сохранении малых токов затвора.

На рисунке 3-7 штрих - пунктирными линиями показаны E_{F0} и E_F - соответственно, положения равновесного и неравновесного уровней Ферми.

На рисунке 3-7 (б) показано, что при больших прямых напряжениях на затворе, когда в традиционных DrHEMT транзисторах с только донорным легированием барьер Шоттки полностью исчезает, в DA-DrHEMT транзисторах с $i - p^+ - i - (\delta:Si)$ структурой барьерного слоя контакта Шоттки сохраняется потенциальный барьер, препятствующий переносу электронов из InGaAs канала в затвор.

Таким образом, в DA-DrHEMT транзисторах сохраняется достаточно сильная локализация горячих электронов в КЯ структуры даже в условиях подачи на затвор настолько большого прямого смещения, при котором в DrHEMT транзисторах с донорным легированием барьер Шоттки полностью исчезает.

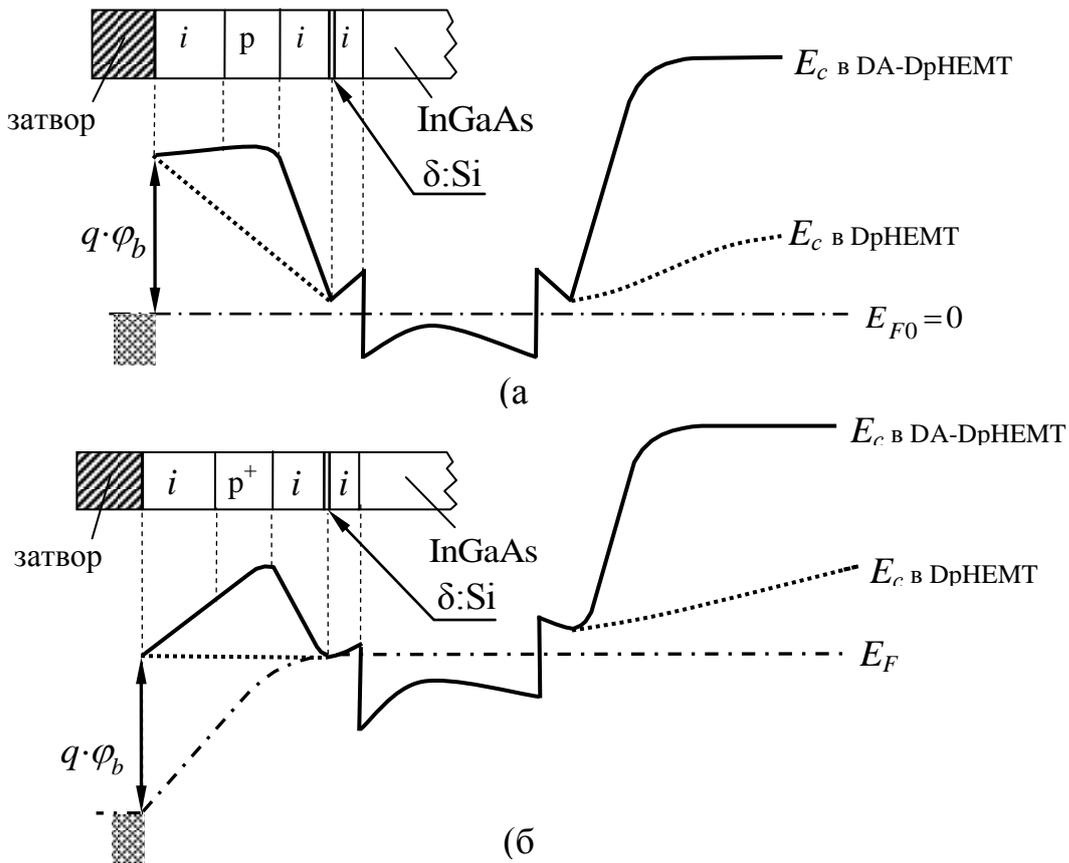


Рис. 3-7. Схематические зонные диаграммы DA-DpHEMT структуры (непрерывная линия) и DpHEMT структуры (пунктирная линия). (а) – внешнее смещение на затворе равно нулю, (б) – внешнее смещение на затворе, равное φ_b .

Экспериментальные образцы транзисторов, изготовленные на основе DA-DpHEMT структур с локализуемыми барьерами, показали уникальные для псевдоморфных структур характеристики (согласно экспериментальным данным, приведенным в таблице 22, получено почти двукратное увеличение удельной выходной мощности и заметное увеличение коэффициента усиления по сравнению с транзисторами на основе DpHEMT гетероструктур с донорным легированием). Для этих экспериментальных образцов DA-DpHEMT транзисторов оптимум положения рабочей точки находился при отрицательных напряжениях на затворе [149,150]. Отмеченным недостатком этих приборов являются только высокие (почти в два раза больше, чем у серийных транзисторов на основе DpHEMT структур) сопротивления истока и стока.

Для решения задачи смещения положения оптимальной по напряжению на затворе рабочей точки в нулевые и положительные напряжения на затворе, были изготовлены экспериментальные образцы DA-DpHEMT транзисторов, в которых между затвором и каналом была сформирована $i - p^+ - i - (\delta:Si)$ структура с увеличенной толщиной слоя $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$, на котором формировался контакт Шоттки.

В DA-DpHEMT гетероструктуре этого назначения тоже использовалось объемное легирование акцепторами (Be) и дельта-легирование донорами (Si). В таблице 23 приведены параметры основных слоев этой DA-DpHEMT гетероструктуры. В процессе изготовления экспериментальных образцов транзисторов (партия 4) на основе гетероструктуры с параметрами, приведенными в таблице 23, избыточно большая толщина слоя 20 уменьшалась таким образом, чтобы обеспечить симметричность формы сток - затворных передаточных ВАХ относительно положения оси тока стока. Именно этот вариант экспериментальных образцов транзисторов показал наиболее эффективную работу в режиме усиления СВЧ мощности при задании напряжения на затворе, равного нулю. Максимальная величина выходной мощности наблюдалась при задании напряжения на затворе, равного нулю.

В экспериментальных образцах транзисторов на основе гетероструктур с параметрами, приведенными в таблице 23, использовалась конструкция серийно выпускаемого транзистора, показанная на рисунке 3-4. Это позволило получать характеристики, соответствующие приборам с достаточно сильно развитой периферией и соответствующим тепловым сопротивлением.

Таблица 23. Основные слои экспериментальных образцов DA-DpHEMT гетероструктур для транзисторов с симметричными сток - затворными ВАХ.

№ слоя	Слой структуры.	Состав. x, y.	Толщина.	Легирование.
0	GaAs подложка	-	625 мкм	SI, (WT)
1	Буферный слой GaAs	-	400 нм	Не легируется
2	С.Р. AlGaAs 6нм/GaAs 5нм x 12	-	-	Не легируется
3	Барьерный слой $-Al_xGa_{1-x}As$	0,25	100 нм	Не легируется
4	Барьерный слой $p^+-Al_xGa_{1-x}As$	0,25	15 нм	$4,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
5	Барьерный слой $-Al_xGa_{1-x}As$	0,25	5 нм	Не легируется
7	Стенка GaAs матрицы	-	0,5 нм	Не легируется
8	δ -Si слой	-	-	$8,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
9	Стенка GaAs матрицы	-	0,5 нм	Не легируется
10	Спейсер - $Al_xGa_{1-x}As$	0,25	3 нм	Не легируется
11	Сглаживающий слой - GaAs	-	3 нм	Не легируется
12	Канал - $In_yGa_{1-y}As$	0,165	14 нм	Не легируется
13	Сглаживающий слой - GaAs	-	1,5 нм	Не легируется
14	Спейсер - $Al_xGa_{1-x}As$	0,25	3 нм	Не легируется
15	Стенка GaAs матрицы	-	0,5 нм	Не легируется
16	δ -Si слой	-	-	$7,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
17	Стенка GaAs матрицы	-	0,5 нм	Не легируется
18	Барьерный слой - $Al_xGa_{1-x}As$	0,25	7 нм	Не легируется
19	Барьерный слой $p^+-Al_xGa_{1-x}As$	0,25	8 нм	$5,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
20	Барьерный слой - $Al_xGa_{1-x}As$	0,25	варьируется	Не легируется

Экспериментальные образцы транзисторов этого типа имели ширину затвора $W_g = 0,8$ мкм при длине основания Г-образного затвора [153] около 0,3 мкм и пробивное напряжение 25 – 28 В. Поскольку формирование делителя входной мощности и сумматора выходных мощностей не предусматривалось, исток и сток формировались в специальных канавках. В таблице 24 представлены первые

типичные результаты измерений СВЧ характеристик этих транзисторов, эффективно работающих при нулевом смещении на затворе [206,207,224,241,242]. Измерения проводились в импульсном режиме на частоте 10 ГГц.

Из результатов, представленных в таблице 24 видно, что экспериментальные образцы DA-DpHEMT транзисторов из партии 4 при задании напряжения на затворе равного нулю и при напряжениях на стоке 11-12 В имеют высокую удельную выходную мощность и коэффициент усиления. Максимальная величина КПД достигается при уменьшении напряжения на стоке до величин менее 10 вольт (что очевидно) и при небольших отрицательных напряжениях на затворе.

Стоит отметить несколько интересных особенностей разработанных приборов: с ростом входной СВЧ мощности выходная СВЧ мощность растет практически линейно в широком диапазоне изменения величины входной СВЧ мощности, а затем быстро начинается резкое насыщение величины выходной мощности (разница мощности при 1 дБ и 3 дБ компрессии мала). Эта особенность поведения экспериментальных образцов DA-DpHEMT транзисторов из партии 4 отличает их в лучшую сторону от серийных DpHEMT транзисторов, она показана на рисунке 3-8. При удельной выходной СВЧ мощности более 1,5 Вт/мм, экспериментальные образцы DA-DpHEMT транзисторов из партии 4 продемонстрировали коэффициент усиления около 12,5 дБ.

Таблица 24. Результаты измерений выходной СВЧ мощности, коэффициента усиления и КПД в импульсном режиме на частоте 10 ГГц для экспериментальных образцов (DA)-DpHEMT транзисторов из партии 4.

№ DA-DpHEMT транзистора (партия 4)	P _{входа} мВт	P _{выхода} мВт	K _p Дб	Рабочая точка			КПД	P _{вых} /W _g Вт/мм
				I _d мА	U _g В	U _d В		
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
	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	1005	10	180	-0,3	10	50	1.25
	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

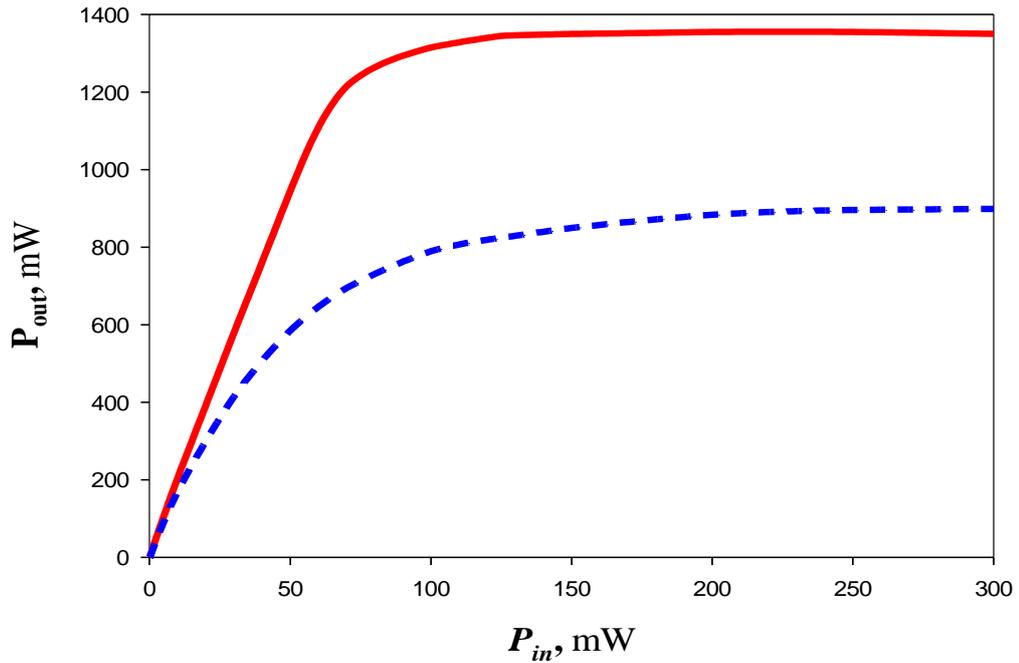


Рис. 3-8. Сравнение зависимостей выходной СВЧ мощности от величины входной СВЧ мощности для серийных DpHEMT (синяя штриховая линия) и для DA-DpHEMT (красная линия) из партии 4. Для DA-DpHEMT задавалась оптимальная величина $U_g=0$ В. Для DpHEMT задавалась своя оптимальная (отрицательная) величина U_g .

На рисунке 3-9 для трех экспериментальных образцов транзисторов из партии 4, изготовленных с шириной затвора 0.42 мм, длиной затвора 0.3 мкм приведены зависимости выходной мощности от напряжения на затворе при напряжении на стоке 12 В и при входной мощности 60 мВт. Измерения проводились в непрерывном режиме подачи входной СВЧ мощности на частоте 10 ГГц.

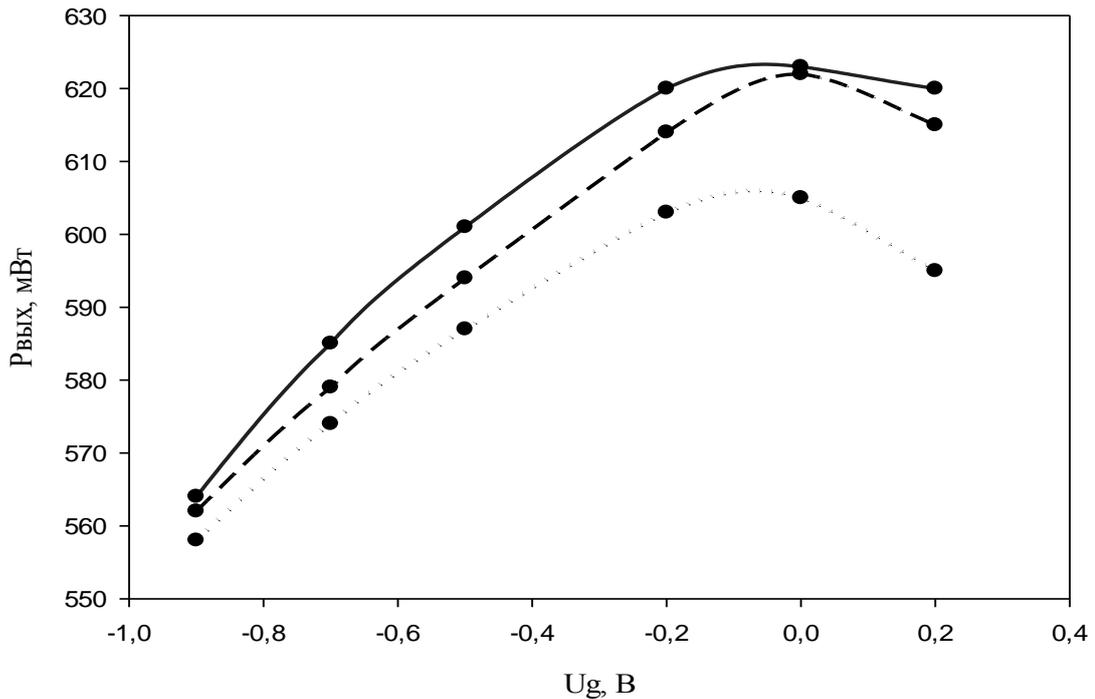


Рис. 3-9. Зависимость максимальной выходной СВЧ мощности для трех экспериментальных образцов транзисторов из партии 4 от напряжения на затворе. Ширина затвора 0.42 мм, длина затвора 0.3 мкм, напряжение на стоке 12 В, входная СВЧ мощность 60 мВт, частота 10 ГГц.

Из результатов, представленных на рисунке 3-9 видно, что экспериментальные образцы (DA)-DrHEMT транзисторов с заглубленными омическими контактами демонстрируют максимальную выходную СВЧ мощность практически при нулевых напряжениях на затворе. Таким образом, в этом эксперименте дополнительно продемонстрирована эффективность влияния $i - p^+ - i - (\delta:Si)$ структур, встроенных между затвором и верхним спейсером DA-DrHEMT транзисторов на возможность расширения допустимого диапазона изменения на СВЧ величины напряжения на затворе при сохранении малых величин тока затвора.

Целевое изменение толщины слоя № 20 в DA-DrHEMT структуре (смотри таблицу 23) показало возможность изменения положения оптимальной (в части получения максимума выходной СВЧ мощности) рабочей точки и продемонстрировало возможность отдачи максимальной выходной СВЧ

мощности в экспериментальных образцах DA-DpHEMT транзисторов при подаче на затвор напряжения постоянного смещения, равного нулю.

3.6. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ DA-rHEMT И DA-DpHEMT ТРАНЗИСТОРОВ

Было сделано естественное предположение, что увеличенные сопротивления истока и стока транзисторов, наблюдаемые в партиях 1÷3 экспериментальных образцов транзисторов, были связаны с наличием в гетероструктурах слоев, легированных примесью р-типа. Учитывая электронный тип проводимости канала, омические контакты в этих транзисторах изготавливались на основе эвтектического сплава Au:Ge. Такой контакт предусматривает дополнительное легирование донорной примесью германия рекристаллизованной области контакта.

Высокий уровень легирования верхнего акцепторного слоя в DA-DpHEMT гетероструктуре с приводит к тому, что после рекристаллизации контакта, в области расположения верхних акцепторов примеси германия оказывается недостаточно много для надежной перекомпенсации акцепторов. Это приводит к увеличению сопротивления истока и стока и даже к смене вида ВАХ омических контактов – ВАХ станут диодного типа. Действительно, в рекристаллизованном слое в области расположения акцепторных слоев при слабой их компенсации примесью германия, образуются слои с повышенным сопротивлением и даже (при высокой концентрации акцепторов) сохраняются потенциальные барьеры (рисунок 3-10).

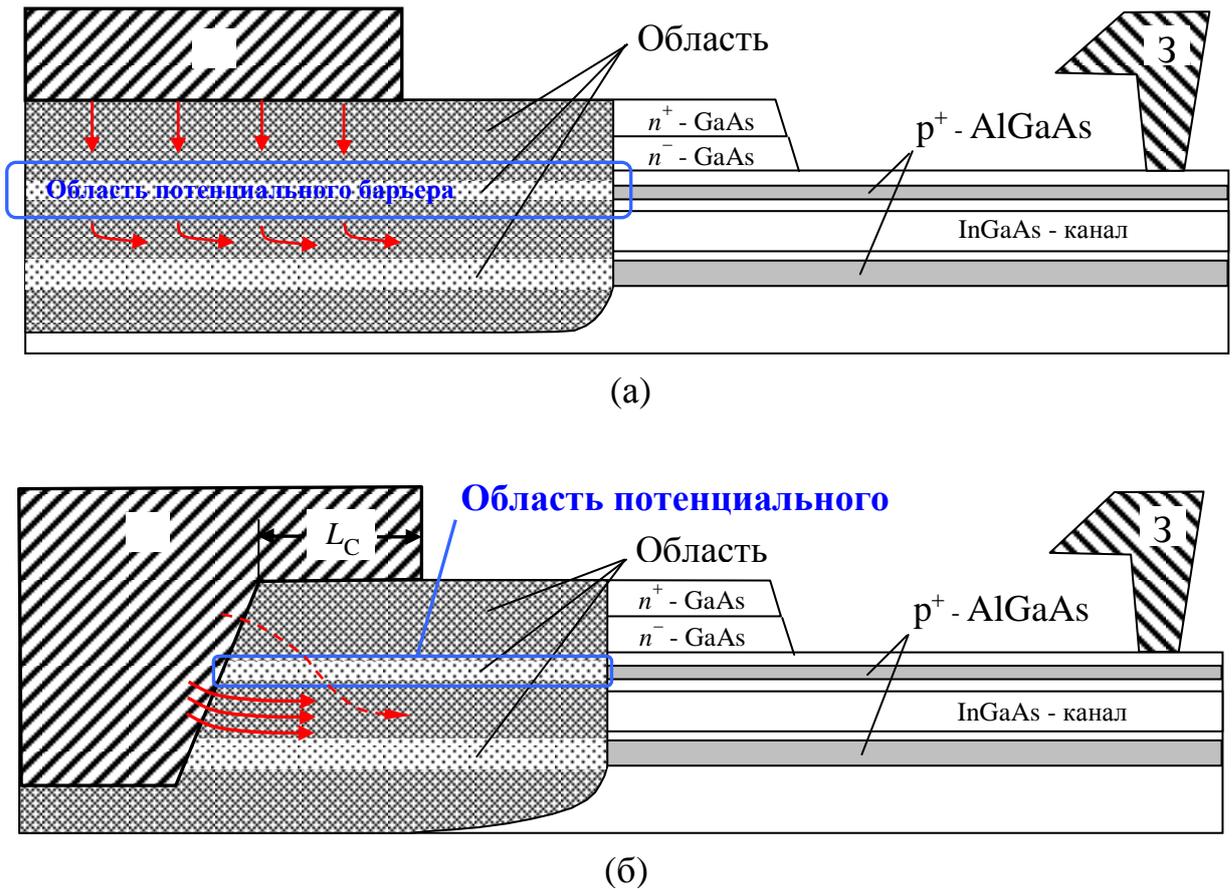


Рис. 3-10. Схематическое изображение фрагмента экспериментального транзистора на основе (DA)-DpHEMT гетероструктур. Особенности формирования омических контактов при отсутствии заглабления в структуре под омический контакт истока (а) и при наличии мезы или специального заглабления в структуре под омический контакт истока (б).

Потенциальный барьер в области расположения верхнего акцепторного слоя препятствует потоку электронов из металла омического контакта в рекристаллизованный слой канала (этот поток показан красными стрелками на рисунке 3-9 (а)) и далее в канал транзистора. Этот потенциальный барьер приводит к формированию у омических контактов ВАХ диодного типа. В том случае, если концентрация акцепторов в области расположения акцепторного слоя достаточно мала, потенциальный барьер не образуется и вместо него формируется слой с повышенным сопротивлением. Эти две возможные ситуации наблюдались

на практике в предыдущих экспериментах: для истока и стока наблюдались как нелинейные ВАХ, так и омические ВАХ с повышенным сопротивлением контакта.

На рисунке 3-10 (а) показано, что при формировании омических контактов стандартным способом сплавления сплава Au:Ge:Ni, напыленного на поверхность слоя $n^+ - GaAs$, рекристаллизованная область оказывается пересеченной слоями гетероструктуры, легированными акцепторной примесью с весьма большой поверхностной плотностью. Это приводит к ряду нежелательных эффектов (появление потенциального барьера, заметное увеличение переходного сопротивления контакта), при этом самую важную отрицательную для омического контакта роль играет присутствие в рекристаллизованной области верхнего акцепторного слоя. Все преимущества DA-DpHEMT гетероструктур в составе транзисторов в наибольшей степени проявляются при использовании высоких уровней легирования акцепторами, что делает проблематичным формирование хороших омических контактов для таких структур, с линейными характеристиками и малым переходным сопротивлением.

Для улучшения омических контактов в экспериментальных образцах транзисторов на основе DA-DpHEMT гетероструктур, была изготовлена и исследована конструкция транзистора (транзисторы из партии 4, параметры их структуры приведены в таблице 6) с заглублением положения нижней границы металла омического контакта в слой № 3 (смотри таблицы 18, 23 и рисунок 3-10(б)). Исходное заглубление в структуре формировалось методом анизотропного травления, что позволило сформировать боковые стенки заглубления с наклоном по отношению к поверхности гетероструктуры. Такая геометрия стенок заглубления позволяет обеспечить при напылении бездефектное покрытие боковых стенок сплавом Au:Ge:Ni и осуществить на боковых стенках формирование омического контакта непосредственно к рекристаллизованному InGaAs – слою канала транзистора. В таком контакте встроенные потенциальные барьеры или области с повышенным сопротивлением (связанные с присутствием верхнего акцепторного слоя в рекристаллизованной области) не препятствуют протеканию потока электронов из металлизации истока в канал (смотри рисунок

3-10(б), красные стрелки). Направление потока электронов из металлизации истока в рекристаллизованную область слоя канала и далее непосредственно в канал транзистора, показано на рисунке 3-10(б) красными стрелками. Надбарьерный поток электронов (он относительно мал) показан на рисунке 3-10(б) красной штриховой стрелкой. Естественно, предполагалось, что в таком варианте конструкции контакта можно практически полностью исключить проблемы, связанные с наличием акцепторных слоев в гетероструктуре и сформировать омический контакт непосредственно к слою канала с малым переходным сопротивлением.

С проблемой качества омических контактов также сталкиваются при разработке мощных полевых транзисторов на основе нитрида галлия, но там её решают несколько другими способами, смотри, например [246-250].

Для оптимизации конструкции омических контактов и после подбора режима травления канавки (или мезы), по предложенной технологии изготавливались экспериментальные образцы транзисторов с шириной затвора, равной 0,42 мм. В этих экспериментальных образцах омические контакты формировались с использованием стандартного напыления эвтектического сплава Au:Ge. При этом задавались различные величины L_C – расстояния на поверхности слоя $n^+ - GaAs$ (рисунок 3-10 (б)) от края металлизации до начала заглабления, расположенного на верхнем краю мезы. Для изменения величины L_C положение края металлизации было фиксировано (заданием нужной координаты в фотошаблоне), тем самым при уменьшении величины L_C стенка мезы на рисунке 3-10(б) смещается к затвору.

Величина сопротивления транзистора «исток – канал – сток», измеренная при максимальном прямом смещении на затворе на омическом участке выходных ВАХ, в зависимости от расстояния L_C , приведена на рисунке 3-11.

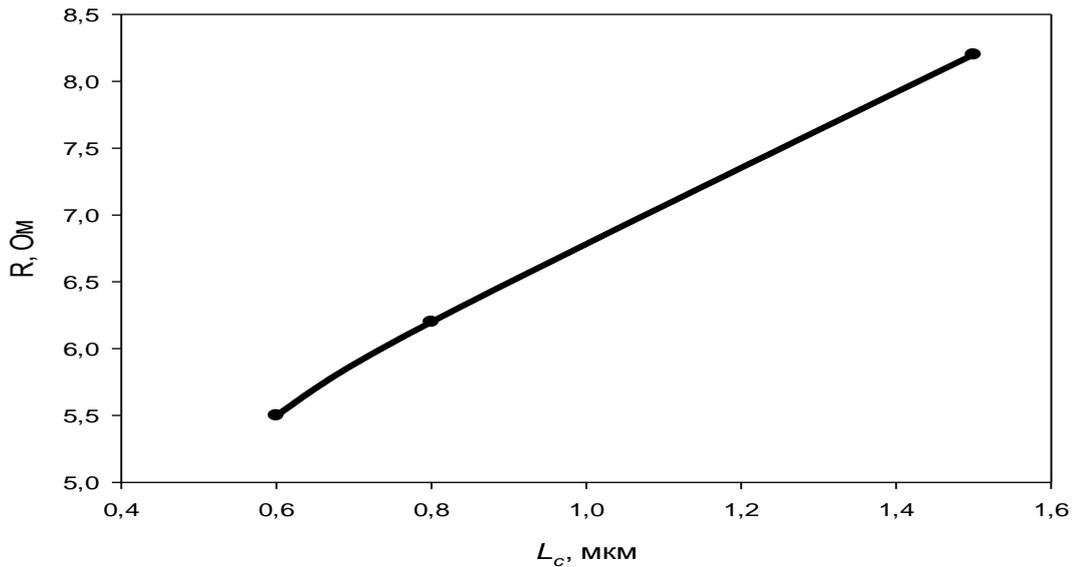


Рис. 3-11. Зависимость сопротивления транзистора «исток – канал – сток», измеренного при максимальном прямом смещении на затворе на омическом участке выходных ВАХ, от длины выступа металлизации на слое $n^+ - GaAs$.

Для всех величин L_C ВАХ контактов имели линейный вид, что говорит о полном подавлении нежелательных барьерных эффектов.

Видно, что использование в конструкции омических контактов заглублений с наклонными боковыми стенками при достаточно малой длине выступа металлизации на поверхность слоя $n^+ - GaAs$, может существенно уменьшать сопротивление омических контактов. Аппроксимация зависимости, представленной на рисунке 3-10, к нулевой длине выступа металлизации, дает уменьшение сопротивления транзистора до величины 3,8 Ом; этот эффект достигнут за счет уменьшения переходного сопротивления омических контактов истока и стока.

Оценки показывают, что такое уменьшение сопротивления транзистора говорит о достижении сопротивлений омических контактов, характерных для величин сопротивлений омических контактов в лучших образцах полевых транзисторов на основе традиционных ДрНЕМТ гетероструктур без акцепторного легирования. Надо отметить, что экспериментальные образцы транзисторов с шириной затвора 0,8 мкм, параметры которых приведены в таблице 24, были

изготовлены с большой длиной выступа металлизации L_C , равной 1,5 мкм, то есть с достаточно большим переходным сопротивлением омических контактов истока и стока.

3.7. РАЗРАБОТКА УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ НА ТРАНЗИСТОРАХ С ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

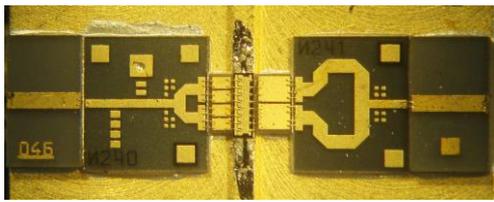
В разделе 3.3 представлены результаты разработки мощного транзистора на DA-DpHEMT гетероструктуре с дополнительными потенциальными барьерами, усиливающими локализацию горячих электронов в слое канала. Эта разработка позволила получать на частоте 10 ГГц выходную мощность GaAs транзисторов в DA-DpHEMT исполнении заметно больше 1 Вт/мм [150,187,251-253]. Апробация таких DA-DpHEMT гетероструктур проводилась в составе конструкции мощного полевого транзистора, имеющего длину основания затвора 0,4 – 0,5 мкм, ширину затвора 0,8 мм и трапецевидную форму поперечного сечения каждой одиночной секции затвора.

На частоте 10 ГГц в импульсном режиме удельная выходная мощность экспериментальных образцов DA-DpHEMT транзисторов составила более 1,7 Вт/мм при коэффициенте усиления более 9,5 дБ и КПД до 50% [149,150]. Полученный результат демонстрирует существенное (в 1,5-2 раза) увеличение коэффициента усиления по мощности по сравнению с транзисторами на традиционных DpHEMT-структурах, не имеющих дополнительных потенциальных барьеров, усиливающих локализацию горячих электронов в слое канала. Этот результат был подтвержден во время последующих экспериментов на DA-DpHEMT транзисторах с общей шириной затвора 0,4 мм, 0,8 мм и 1,2 мм и с длиной основания затвора 0,3 и 0,5 мкм [251-253]. При этих экспериментах все измерения мощности проводились с помощью измерительной установки, в которой согласующие трансформаторы обеспечивали хорошее согласование только в одной задаваемой точке частотного диапазона (10 ГГц). Поэтому для оценки эффективности применения DA-DpHEMT транзисторов в промышленных вариантах конструкций усилителей СВЧ мощности, были проведены измерения

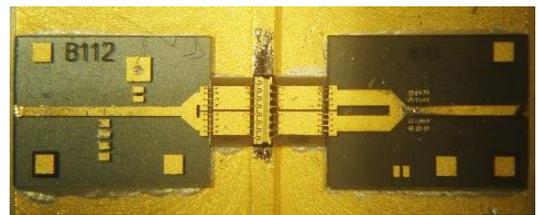
параметров транзисторов с большой шириной затвора в используемых на практике согласующих схемах в достаточно широкой полосе частот [254-256].

3.7.1. Сравнение выходных характеристик усилительных каскадов на основе DA-DpHEMT и DpHEMT транзисторов с одинаковой топологией

Для сравнительного исследования работы и возможностей DpHEMT и DA-DpHEMT транзисторов непосредственно в схеме усилителя, были изготовлены DA-DpHEMT транзисторы с шириной Г-образного затвора, равной 4,8 мм. Несколько экземпляров транзисторов были смонтированы в тестовые измерительные схемы двух типов (смотри рисунок 3-12). Эти схемы предназначены для тестирования мощных СВЧ транзисторов в рHEMT исполнении, выпускаемых АО «НПП «Исток» им. Шокина», в диапазоне частот 8-12 ГГц.



(а)



(б)

Рис. 3-12. Фотографии двух типов тестовых схем с DA-DpHEMT транзистором: (а) – схема тип 1, (б) – схема тип 2.

Тестовые схемы состоят из двух плат толщиной 0,25 мм, выполненных из керамики БСТ (барий-самарий-титан) с диэлектрической проницаемостью 80, и двух поликорковых плат толщиной 0,25 мм. Микрополосковые линии на керамике БСТ являются основными элементами согласования транзистора, расположенные на поликорковых платах делитель и сумматор мощности, помимо своих основных функций, также играют роль дополнительных элементов согласования. Так как тестовые платы разрабатывались как универсальные для нескольких типов транзисторов, то для получения оптимальных выходных характеристик дополнительно использовались простые подстроечные элементы из индиевой фольги. В целях достижения максимальной выходной мощности, для

усилительного каскада на DA-DpHEMT транзисторе были подобраны длины отрезков микрополосковых линий (из имеющихся в наличии на БСТ керамике). Однако, поскольку делители и сумматоры ранее были рассчитаны и изготовлены для другого типа транзисторов, то площадь, занимаемая подстроечными In-элементами, на некоторых образцах оказалась довольно значительной (рисунок 3-13).

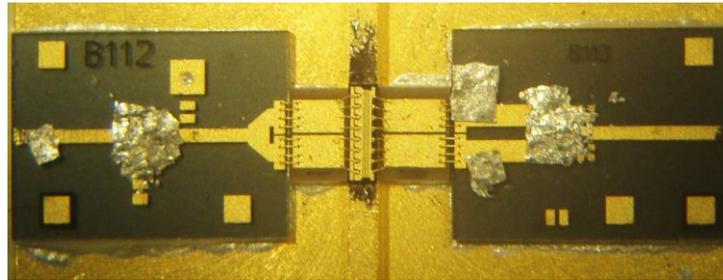


Рис. 3-13. Фотография тестовой схемы типа 2 с DA-DpHEMT транзистором, настроенная на максимум выходной СВЧ мощности с помощью индиевых подстроечных элементов.

Был проанализирован большой массив данных из результатов измерений, полученных в тестовых схемах типов 1 и 2 с традиционными DpHEMT транзисторами, из которого были выбраны наиболее типичные образцы для сравнения с результатами измерений в тестовых схемах с DA-DpHEMT транзисторами.

На рисунке 3-14 приведены частотные зависимости выходных характеристик одной из тестовых схем типа 1 с DA-DpHEMT, и характеристики тестовой схемы типа 1 с DpHEMT, измеренные при $P_{\text{вх}}=500$ мВт и напряжении на стоке 8В.

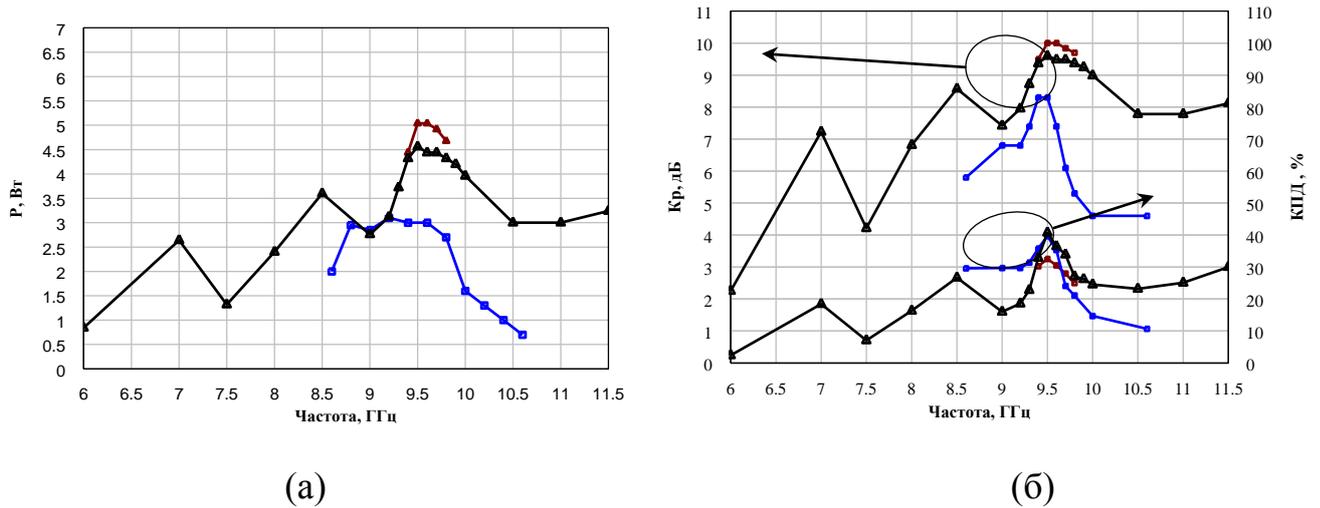


Рис. 3-14. Выходные характеристики тестовых схем типа 1: (а) зависимость выходной мощности от частоты, (б) зависимости коэффициента усиления по мощности и КПД от частоты. — Δ — - DA-DpHEMT при $U_d=8V$, — Δ — - DA-DpHEMT при $U_d=9V$, — \square — - DpHEMT при $U_d=8V$.

Из графиков, представленных на рисунке 3-14 видно, что выходная СВЧ мощность и коэффициент усиления тестовой схемы с DA-DpHEMT транзистором более чем в 1,5 раза превосходит аналогичные параметры в тестовой схеме 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 U_d более 9 В, в то время как у DpHEMT ухудшаются выходные характеристики при увеличении напряжения на стоке U_d более 8 В. Для демонстрации максимальных возможностей транзисторов, в дальнейшем измерения СВЧ параметров DA-DpHEMT транзисторов проводились при напряжении на стоке 9 В, а измерения СВЧ параметров DpHEMT – при напряжении на стоке 8 В.

На рисунке 3-15 приведены частотные зависимости выходных характеристик двух тестовых схем типа 2 с DA-DpHEMT в сравнении с характеристиками тестовой схемы типа 2 с DpHEMT, измеренные при входной СВЧ мощности $P_{\text{вх}}=500$ мВт. Как видно из графиков, оба типа транзисторов в схеме данного типа 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 %.

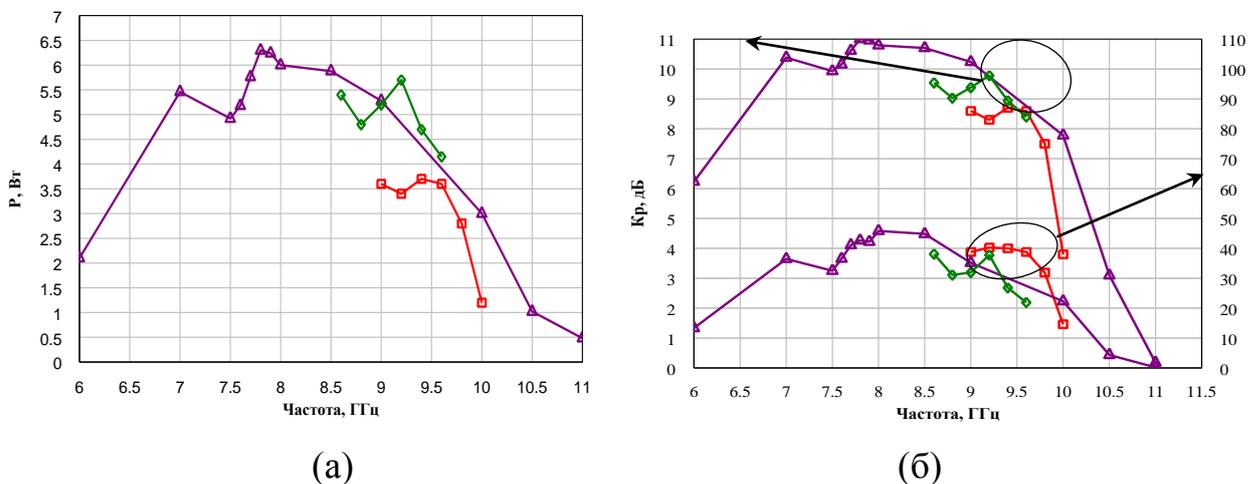


Рис. 3-15. Выходные характеристики тестовых схем типа 2: (а) зависимость выходной мощности от частоты, (б) зависимости коэффициента усиления по мощности и КПД от частоты. $-\triangle-$ - DA-DpHEMT (Образец 1) при $U_a=9В$, $-\diamond-$ - DA-DpHEMT (Образец 2) при $U_a=9В$, $-\square-$ - DpHEMT при $U_a=8В$.

Если соотнести полученные результаты с удельной мощностью транзистора, то получим, 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 полосе частот 7-9 ГГц – более 1 Вт/мм. При этом DpHEMT транзистор с таким же затвором имеет удельную выходную мощность, равную всего лишь 0,7 Вт/мм в полосе частот 9-9,5 ГГц. Представленные характеристики усилительного каскада на DA-DpHEMT находятся на уровне лучших мировых достижений в области разработки мощных транзисторов на AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктурах [257] (а, возможно, и превосходят его, т.к. получены при большом значении общей ширины затвора – 4,8 мм, и в достаточно широком диапазоне частот).

На рисунке 3-16 приведено семейство графиков амплитудных характеристик выходной мощности транзисторов в тестовых схемах типа 2, измеренных на частоте 9,2 ГГц. Из графиков видно, что на частоте 9 ГГц при входной мощности 600 мВт и напряжении на стоке 9,5 В, в импульсном режиме

выходная мощность тестовой схемы с DA-DpHEMT транзистором составила более 6 Вт.

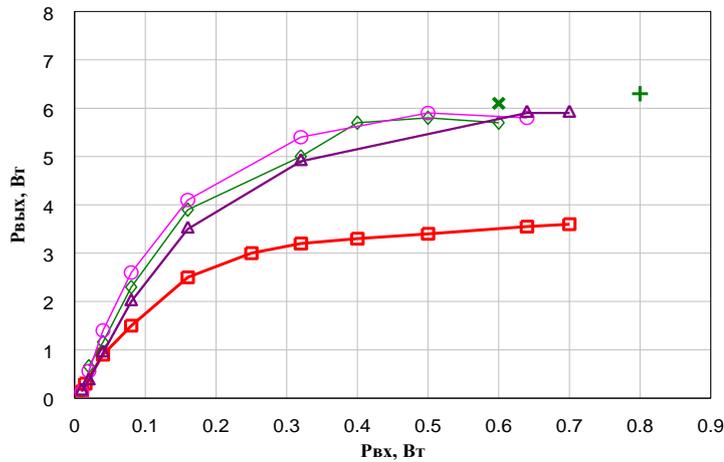


Рис. 3-16. Амплитудные характеристики тестовых схем типа 2 на частоте 9,2 ГГц на основе транзисторов: Образец 2 DA-DpHEMT при $U_d=9\text{В}$ ($\text{—}\diamond\text{—}$), $U_d=9,5\text{В}$ (\times), $U_d=10\text{В}$ ($+$); Образец 3 DA-DpHEMT при $U_d=9\text{В}$ ($\text{—}\circ\text{—}$); Образец 4 DA-DpHEMT при $U_d=9\text{В}$ ($\text{—}\triangle\text{—}$); DpHEMT при $U_d=8\text{В}$ ($\text{—}\square\text{—}$).

Из рисунков 3-15 и 3-16 видно, что, как и в тестовой схеме типа 1, DA-DpHEMT транзистор в тестовой схеме типа 2 демонстрирует выходную мощность и коэффициент усиления более чем в 1,5 раза превосходящие аналогичные характеристики для тестовых схем с транзисторами в DpHEMT исполнении.

Следует отметить, что оба типа транзисторов, сравниваемых по поведению в составе одинаковых тестовых схем, были изготовлены по одной и той же технологии с использованием метода оптической литографии, имели одинаковую топологию и длину затвора.

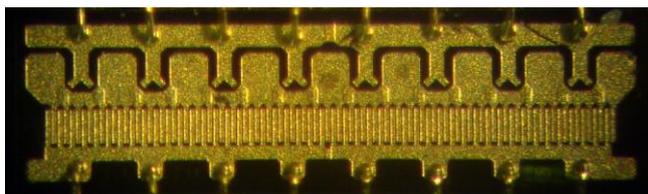
3.7.2. Сравнение выходных характеристик усилительных каскадов на основе DA-DpHEMT и DpHEMT, изготовленных по разным технологиям

Для сравнения были выбраны DA-DpHEMT и DpHEMT транзисторы, имеющие следующие основные геометрические размеры:

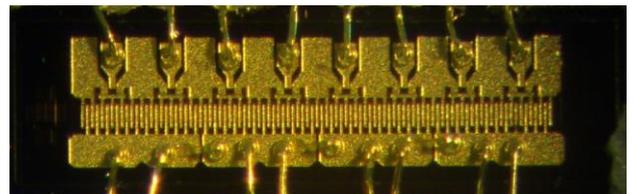
DA-DpHEMT транзистор с длиной основания затвора 0,3 мкм при ширине затвора 4800 мкм. Размер кристалла 600x1950 мкм, толщина полупроводниковой подложки 100 мкм, расстояние между затворами 28 мкм;

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.

Изготовление всех элементов конструкции DA-DpHEMT транзистора проводилось с использованием установки проекционной фотолитографии Nikon, большинство операций изготовления DpHEMT транзистора также проходило с использованием этого типа литографа, однако литография, формирующая затворы транзисторов, проводилась методом электронно-лучевой литографии (нанолиитограф фирмы Vistec). На рисунке 3-17 приведены фотографии сравниваемых транзисторов, а на рисунке 3-18 – частотные зависимости выходных характеристик сравниваемых транзисторов в тестовых схемах типа 2.



(a)



(б)

Рис. 3-17. Фотографии транзисторов: (а) - в DA-DpHEMT исполнении, (б) - в DpHEMT исполнении.

Из сравнения результатов измерений (смотри рисунок 3-18) видно, что при входной мощности 500 мВт и напряжении на стоке 9 В для DA-DpHEMT транзистора и при входной мощности 700 мВт и напряжении на стоке 8В для DpHEMT транзистора, выходная СВЧ мощность и КПД в тестовых схемах типа 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, хотя DA-DpHEMT имеет общую ширину затвора в 1,4 раза меньше, чем DpHEMT.

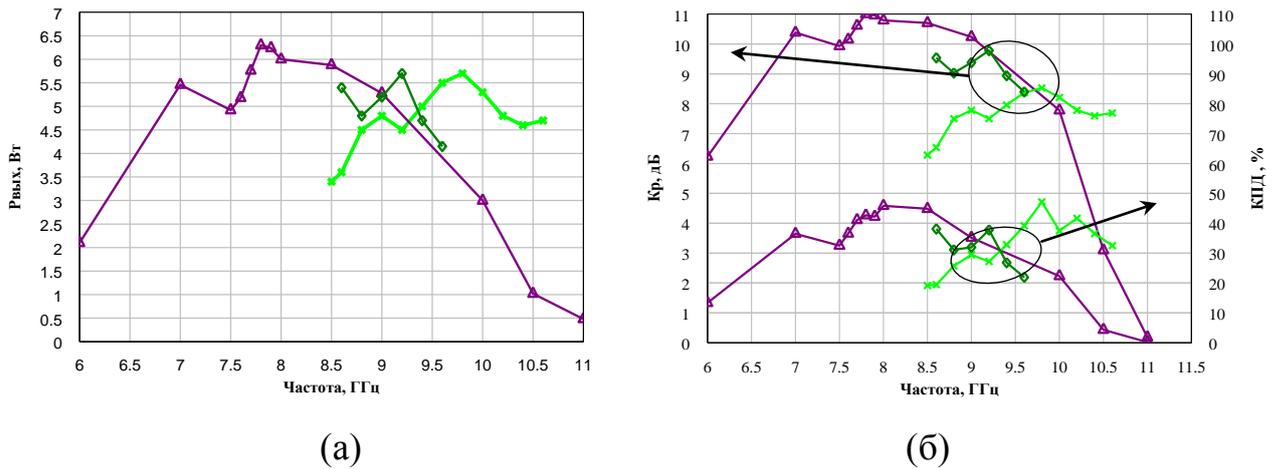


Рис. 3-18. Выходные характеристики тестовых схем типа 2: (а) зависимость выходной мощности от частоты, (б) зависимости коэффициента усиления по мощности и КПД от частоты. — Δ — - DA-DpHEMT (Образец 1) при $U_d=9В$, — \diamond — - DA-DpHEMT (Образец 2) при $U_d=9В$, — \square — - DpHEMT при $U_d=8В$.

Необходимо отметить ещё две особенности DA-DpHEMT транзистора:

- 1) DA-DpHEMT транзисторы были изготовлены с помощью метода оптической литографии, что сокращает время операции экспонирования в 10 раз, и ведет к снижению общей стоимости изделия;
- 2) Сравнительно большая финишная толщина подложки (100 мкм) обеспечивает простоту монтажа DA-DpHEMT транзисторов в гибридные схемы.

Важно отметить, что эти преимущества достигаются не только за счет использования нового типа гетероструктуры (DA-DpHEMT), но и способом изготовления транзистора [153].

Из результатов проведенных измерений видно, что удельная выходная мощность DA-DpHEMT транзистора с общей шириной Γ – затвора, равной 4,8 мм

оказалась меньше удельной выходной мощности DA-DpHEMT транзистора с общей шириной трапецевидного затвора, равной 0,8 мм [149,150,251-253]. По-видимому, этот результат обусловлен как потерями при суммировании выходных мощностей с отдельных секций транзистора, так и тем, что усилительный каскад был настроен на более широкую полосу частот (более 20%) [258]. Также возможен естественный разброс характеристик между партиями транзисторов в условиях пока окончательно не отработанной технологии изготовления.

Очевидно, что включение делителя входной СВЧ мощности и сумматора выходной СВЧ мощности, выполненных с применением микролитографии, в состав конструкции транзистора, позволит улучшить полученный результат.

3.8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 3

Проведены исследования работы DA-DpHEMT транзисторов с большой шириной затвора (4,800 мм) в используемых на практике усилительных схемах. Показано, что мощные гетероструктурные полевые транзисторы с донорно-акцепторным легированием обеспечивают в усилительных каскадах выходную СВЧ мощность, более чем в 1,5 раза превышающую выходную мощность усилителей с транзисторами на традиционной гетероструктуре (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 мм, 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны оригинальная конструкция и технология изготовления мощного полевого транзистора, позволяющие использовать наклонное напыление металлов для обеспечения фиксированного расположения секций 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 Γ – 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-pHEMT 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 DrHEMT 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 DrHEMT – структурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. Милнс Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М. Мир 1977.
2. М. Шур. Современные приборы на основе арсенида галлия. М. Мир. 1991.
3. Vinsent G., Chantre A., Bois D. Electric field effect on the thermal emission of traps in semiconductor junction// J.Appl.Phys. 1979. V.50. № 8.P. 5484-5487.
4. В.С.Ершов,З.А.Зайцевская, А.А.Кальфа, А.Р.Крюков, С.В.Матыцын, А.Б.Пашковский, Ю.Ю.Федоров Влияние глубоких уровней на вольт-амперные характеристики гетероструктурных полевых транзисторов с селективным легированием // Физика и техника полупроводников, 1991, Т.25, В.5, С.776-782.
5. А.А.Кальфа, А.Б.Пашковский, А.С.Тагер Полевая и ударная ионизация глубоких энергетических уровней в полевых транзисторах на гетероструктурах с селективным легированием // Физика и техника полупроводников, 1992, Т.26, В.9, С.1574-1579.
6. Н.Касано Role of diffused Ga vacancy in the degradation of vapor-ground GaAs // J.Appl.Phys. 1978, V.49. № 9. P. 4746-4749.
7. А.Б.Пашковский, А.С.Тагер, Ю.Ю.Федоров Влияние глубоких уровней и профиля подвижности электронов на диффузионный шум в полевых транзисторах // Микроэлектроника, 1990, Т.19, В.5. С.486-492.
8. В. van Rees, В. Leles, В.Нewitt, W.Schaff The effect of the deep levels on the large-signal performance on GaAs FET's // Inst. Phys. Conf. Ser. 1982, № 65. P. 355-358.
9. R.Wroblewski, G.Salmer, Y.Crosnier Theoretical Analysis of the DC Avalanche Breakdown in GaAs MESFET's // IEEE Trans. Electron. Dev. 1983, V.30. № 2. P. 154-159.
10. Я.Б.Мартынов, А.С.Тагер Особенности лавинного пробоя планарного полевого транзистора с затвором Шотки // Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1988, В.7(411). С. 14-20.

11. W.E.Spicer, I.Lindan, P.Skeath, C.Y.Su Unified defect model and beyond // J. Vac. Sci. Technol. 1980. V.17. № 5. P. 1019-1022.
12. F.Heliodore, M.Lefebvre, G.Salmer, O.L.El-Sayd Two-Dimensional Simulation of Submicrometer GaAs MESFET's Surface Effects and Optimization of Recesses Gate Structure // IEEE Trans. Electron. Dev. 1988. V.35. № 7. P. 824-830.
13. В.И.Босый, А.Г.Максименко, В.А.Москалюк, В.И.Тимофеев Моделирование влияния глубоких центров на шумы полевых транзисторов // Тез. докл. V Всесоюзной конференции "Флуктуационные явления в физических системах". Паланга. 1988. С. 54-55.
14. И.А.Баранов, А.В.Климова, Л.В.Манченко, О.И.Обрезан, А.Б.Пашковский "Влияния глубоких уровней в буферном слое на характеристики транзисторов и малошумящих усилителей при воздействии импульсов СВЧ мощности на входе", Радиотехника, 2006 г. No 3, с. 72-77.
15. Механизм отказов и надежность транзисторов на арсениде галлия: Обзоры по электронной технике. Сер. Полупроводниковые приборы / А. М. Нечаев, В. Ф. Синкевич, Е. И. Соколова, Н. В. Степанова. — М.: ЦНИИ «Электроника», 1981. — Вып. 2(778). — С. 42.
16. Современный уровень и перспективы развития разработок полевых транзисторов на арсениде галлия. Ч. 2: Обзоры по электронной технике. Сер. Полупроводниковые приборы / В. Н. Данилин. — М.: ЦНИИ «Электроника», 1979. — Вып. 8. — С. 37.
17. Егудин А. Б., Чкалова О. В., Еленский В. Г. Малошумящие СВЧ полевые транзисторы с барьером Шоттки //Зарубежная радиоэлектроника. — 1980. — № 10. — С. 28— 48.
18. Das M. V., Chosk P. K. Low frequency emissions from deep levels in GaAs MESFET's // Electron Lett. — 1982. — Vol. 18, No 5. — P. 207—208.
19. Любченко В. Е., Сонин В. С. Вольт-амперные характеристики субмикронных эпитаксиальных пленок арсенида галлия в сильных СВЧ полях //Электронная техника. Сер. I, Электроника СВЧ. — 1983. — Вып. 4(352). — С. 24—25.

20. Arnold D., Fisher R., Klem J., Ponse F., Morkot H. Redaction of backgating in GaAs /AlGaAs MESFET's by optimisation of active-layer /buffer layer interface //Electron Lett. — 1984.— Vol. 20, No 9. — P. 376—377.
21. Anderson M. G. Electrical traps in GaAs microwaves FET's//Electron Lett. — 1976. — Vol. 12, No 12. — P. 297—298.
22. Kocot K., Stolte C. A. Backgating in GaAs MESFET's//IEEE Trans. Electron. — Dev. 1982. — Vol. ED-29, No 7. — P. 1059—1064.
23. Кальфа А. А. Аналитическая теория статического домена у затвора полевого транзистора //ЖТФ. — 1983. — Т. 53. — № 3. — С. 592—594.
24. Воробьев Ю. В., Костылев С. А., Макарова Т. В., Прохоров Е. Ф. Захват горячих электронов в структурах эпитаксиальная пленка n-GaAs — полуизолирующая подложка //ФТП. — 1984. — Т. 18. — № 10. — С. 1784—1787.
25. De Salles A. A. Optical control of GaAs MESFET's // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. — 1983. — Vol. 31, No 10. — P. 812—820.
26. Umeda T., Cho J. Effect of incident light illumination shape on responsivity of GaAs MESFET photodetector // Jap. J. Appl. Phys. — 1985. — Vol. 24, No 5. — P. L 367—L 369.
27. Vaterkonski L., Pernisek M., Berdai M. Numerical and experimental study of surface effects on GaAs planar photoconductors // Solid St. Electron. — 1984. — Vol. 27, No 2. — P. 207-209.
28. Photovoltaic effect of GaAs MESFET layers / G. L. Papaioannou, J. A. Kaliakatsos, P. C. Euthymiou a. o. //IEEE Proc.— 1985. — Vol. 132, No 3. — P. 167—169.
29. Тегуде Ф. И., Хейме К. Изучение глубоких уровней в слоях на подложках из полуизолирующего арсенида галлия методом полевого транзистора // Полуизолирующие соединения АЗВ5. — М.: Металлургия, 1984. — С. 210—215.
30. Shur M. S. Analytical model of GaAs MESFET's // IEEE Trans. Electron. Dev. — 1978. — Vol. 25, No 6. — P. 612—618.

31. 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.
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. 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.
34. Денисов А.А., Доржин Г.С., Лактюшин В.Н., Садофьев Ю.Г.//Обзоры по электронной технике, Сер.7, Технология, организация производства и оборудование. 1986. М. ЦНИИ "Электроника", С. 56.
35. Theis T.N., Mooney P.M., Wright S.L. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 60. № 4. P. 361 - 364.
36. П.С.Белоусов, А.А.Кальфа, А.Р.Крюков, С.В.Матыцын, В.А.Михайлов, Пашковский А.Б. Исследование экспериментальных образцов полевых транзисторов на гетероструктурах с селективным легированием // Электрон. техн., Сер.1 Электроника СВЧ, 1990.
37. В.С.Ершов,З.А.Зайцевская, А.А.Кальфа, А.Р.Крюков, С.В.Матыцын, А.Б.Пашковский, Ю.Ю.Федоров Влияние глубоких уровней на вольт-амперные характеристики гетероструктурных полевых транзисторов с селективным легированием // ФТП, 1991, Т.25, В.5, С.776-782.
38. Dhar S., Hong W.-P., Bhattaharya P.K., Nashimoto Y., Juang F.-Y. A Detailed Investigation of the D-X Center and Other Trap Levels in GaAs-AlX Ga1-XAs Modulation-Doped Hetero-structures Grown by Molecular-Beam Epitaxy // IEEE Trans. Electron Dev. 1986. V. 33. № 5. P. 698-706.

39. Prinz V., Rechkunov S. N. Influence of a strong electrical field on carrier capture by nonradiative deep—level centres in GaAs//Phys. Stat. Sol. (b). — 1983. — Vol. 118, No 1. — P. 159—166.
40. Current limitation induced by infrared light in n-type GaAs thin layers on semi-insulating Cr-doped GaAs / K. Kitachara, K. Nakai, A. Shibatani, S. Ohkawa // Jap. J. Appl. Phys. — 1982. — Vol. 21, No 3. — P. 513—516.
41. Influence of buffer thickness on the performance of GaAs field effect transistors prepared by molecular beam epitaxy / S. L. Su, R. E. Thorne, R. Fischer a. o. //J. Vac. Sci. and Technol. — 1982. — Vol. 21, No 4. — P. 961—964.
42. Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. Н. Айнспрука и У. Уиссмана. — М.: Мир, 1988.
43. Miers T. H. Schottky contact fabrication for GaAs MESFET's // J. Electrochem. Soc. — 1982. — Vol. 129, No 8. — P. 1795—1799.
44. Стриха В. И. Теоретические основы работы контакта металл—полупроводник. — Киев: Наукова думка, 1974.
45. Б. В. Маркин, О. С. Трифонова, В. В. Чикун, В. Г. Лапин, М. Г. Пономарева, Влияние химических обработок на характеристики барьеров Шоттки в полевых транзисторах, Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1990, В.10(434). С. 42-44.
46. Shappirio J. Diffusion barriers in advanced semiconductor device technology // Solid State Technology. — 1985. — Vol. 28, No 10. — P. 161.
47. Ogava M. Alloying behavior of Ni/AuGe films on GaAs // J. Appl. Phys. — 1980.—Vol. 51. — P. 406.
48. Remba R. D. et al. Use of a TiN barrier to improve GaAs FET ohmic contact reliability // IEEE Elect. Dev. Lett. — 1985. — Vol. EDL-68. — P. 437—438.
49. Wolters R. and Nellisen A. Properties of reactive sputtered TiW // Solid State Technol. — 1986. — Vol. 29, No 2. — P. 131 — 136.
50. Shappirio J. R., Finnegan J. J., Lux R. A. Diboride diffusion barriers, in silicon and GaAs technology // J. Vacuum Sci. Technol. B., Second Series. — 1986. — Vol. 4, No 6. — P. 1409—1415.

51. Thompson J. A., Remba R. D. Use of diffusion barriers for improved reliability GaAs FET's // J. of the Electrochemical Society. — 1987. — Vol. 134, No 12. — P. 3205— 3206.
52. Crescenzi E. J., Thompson J. A. et al. Operating characteristics of 2—8 KHz GaAs MESFET amplifiers at elevated case temperatures to 200 degrees centigrade//IEEE MTT-s Digest. — 1987.—Vol. 2, June 9—10.—P. 837—840.
53. К. Г. Ноздрина, К. В. Дудинов, В. Ф. Лапин, А. В. Галанихин К. П. Петров Использование диффузионного барьера при формирований омических контактов полевых транзисторов на арсениде галлия. Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1991, В. 2(436). С. 45-47.
54. P.M.Smith, P.C.Chao, K.H.V.Duh 94 GHz transistor amplification using an HEMT // Electron. Lett. 1986. V.22. № 22. P. 760-761.
55. E.A.Sovero, A.Gupta, J.A.Higgins Noise figure charecteristics of 1/2 - μm gate single-heterojunction high-mobility FET's at 35 GHz // IEEE Electron. Dev. Lett. 1986. V.7. № 3. P. 179-181.
56. U.K.Misra et. al. Microwave Performance of AlInAs - GaInAs HEMT's with 0,2- and 0,1- μm Gate Length // IEEE Electron. Dev. Lett. 1988, V.9. № 12. P. 647-649.
57. P.C.Chao et. al. 94 GHz Low-Noise HEMT // Electronics Lett. 1989. V.25. № 8. P. 504-505.
58. Jin-ping Ao, Qing-ming Zeng, Yong-lin Zhao, Xian-jie Li, Wei-ji Liu, Shi-yong Liu, and Chun-guang Liang, InP-Based Enhancement-Mode Pseudomorphic HEMT with Strained In_{0.45}Al_{0.55}As Barrier and In_{0.75}Ga_{0.25}As Channel Layers // IEEE Electron Dev. Lett. 2000, V. 21, N. 5, P. 200-202.
59. S. C Wang, J. S. Liu, K. C Hwang, W. Kong, D. W. Tu, P. Ho, L. Mohnkern, K. Nichols, and P. C Chao, High Performance Fully Selective Double Recess InAlAs/InGaAs/InP HEMT's // IEEE Electron Dev. Lett. 2000, V. 21, N. 7, P. 335-337.
60. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007. № 12. p. 2719-2725.

61. A.Cappu, B.Carnez, R.Fauquemberques, G.Salmer, E.Constant Comparative Potential Performance of Si, GaAs, InP, InGaAs Submicrometer Gate FET's // IEEE Trans. Electron. Dev. 1980.V.27. № 11. P. 2158-2160.
62. Тагер А. С. Перспективы применения фосфида индия в электронике СВЧ // Фосфид индия в полупроводниковой электронике: Тез. докл. Всесоюз. совещания. – Кишинев, 1985. – С. 5–7.
63. Кальфа А. А., Пашковский А. Б., Тагер А. С. Характеристики фосфининдиевого полевого СВЧ-транзистора с субмикронным затвором // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. – 1986. – Вып. 3(387). – С. 42–43.
64. High speed-operation of InP metal-insulator-semiconductor field-effect transistors growth by chloride vapor phase epitaxy / A. Antreasyan, P. A. Garbinski, V. D. Mattera et al. // Appl. Phys. Lett. — 1987. – Vol. 51, No 11.– P. 1037–1039.
65. 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.
66. Ymai Y., Ohwada K Application of reactive-ion-beam etching to recessed-gate GaAs metall-semiconductor field-effect transistors // J. Vac. Sci. Technol. — 1987. — Vol. 5, No 4. — P. 889—893.
67. Максимова Н. К., Романова И. Д., Филонов Н. Г. Особенности электрических и теплоэлектрических явлений в структурах с барьером Шотки на GaAs, имплантированном ионами кислорода // ФТП. — 1985. — Т. 19, № 1. — С. 92—95.
68. Braslau N. Alloyed ohmic contacts to GaAs // J. Vac. Sci. Technol. — 1981. — Vol. 19, No 3. — P. 803.
69. Chang C. C. et al. Transmission electron microscopy of Au-based ohmic contacts // J. Appl. Phys. — 1979. — Vol. 50, No 2, Pt. 1. — P. 7030.

70. Jih-Cheng Shin et al. Summary abstract: Transmission electron microscopy studies of microstructure of AuNiGe ohmic contact to n-type GaAs // J. Vac. Sci. Technol. A. Second Series.— 1987.—Vol. 5, No 4, Pt. 11. —P. 1485— 1486.
71. Структура, топология и свойства пленочных резисторов / Л. И. Гурский, В. А. Зеленин, А. Л. Жебвин, Г. Л. Вахрин. — Минск: Наука и техника, 1987.
72. С. В. Кармазин, В. Г. Лапин Физическая модель определения сопротивлений истока и стока в полевых транзисторах с затвором Шоттки, Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1988, В.8(412). С. 24-27.
73. Davis L. E. et al. Handbook of auger electron spectroscopy, 2nd ed // Phys. Electr. Dev., Perkin-Elmer Corp. — Minnesota, 1976.
74. Выращивание и некоторые свойства объемных кристаллов фосфида индия / С.И. Радауцан, Е. В. Руссу, Г. С. Коротченков и др. // Полупроводниковые материалы для твердотельной электроники. – Кишинев, Штиинца, 1982. – С. 75–85.
75. Гарматин А.В. Программа моделирования методом Монте-Карло нестационарных процессов разогрева электронов электрическим полем в полупроводниках // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. – 1985. – Вып. 3(377).– С. 66–68.
76. G. C. Taylor, Yun Yong-Hoon et al. GaAs Power Field-Effect Transistors for Ku-Band Operation “RCA Review”, 1981, v. 42, № 4, pp. 508-521.
77. K. Alavi et al. A very high performance, high yield, and high throughput millimeter wave power PHEMT process technology. “GaAs MANTECH, Inc., 2001.
78. Jong-Won Lim, Ho-Kyun Ahn et al. Fabrication and Characteristics of 0,12 μm Single and Double-Recessed Gate AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT’s Using a SiNx Pre-Passivation Layer “Sournal of the Korean Physical Society”, 2006, vol. 49, Dec., pp. S774-S779.
79. X.Cao et al. Mm-wave performance of 50nm T-gate AlGaAs/InGaAs PHEMTs with fT of 200 GHz. “11-th GaAs Symposium. Munich”, 2003, p. 13-15.

80. B. Hadad, I. Toledo, J. Kaplun et al. Cost Effective T-Gate Process for PHEMT-based MMIC with Large Gate Periphery. *IEEE Electron Devices Lett.*, vol. 20, pp. 551-553, 1999.
81. T. Suemitsu, T. Ishii, H. Yokoyama et al., 30-nm gate InP-based lattice-matched high electron mobility transistors with 350 GHz cutoff frequency. "Jpn. J. Appl. Phys.", 1999, part 2, vol 38, pp. 154-156.
82. J. Udomoto et al. An 11 W Ku-band Heterostructure FET with WSi/Au T-shaped Gate "IEEE MTT-S 1995 Intern. Microwave Symposium", pp. 339-342.
83. Y. Hirachi and S. Kuroda Status of millimeter-wave MMIC's and their application in Japan. "GaAs 2000 Symposium. Paris", 2000, pp. 369-372.
84. L. D. Nguyen, L. E. Larson and U.K. Mishra "Ultra-high-speed modulation doped field effect transistors", *Proc. IEEE*, vol. 60, pp. 494-518, April 1992.
85. A. Endoh, Y. Yamashita, M. Higashiwaki, K. Hikosaka, T. Mimura, S. Hiyamizu and T. Matsui, "High f_T 50-nm-gate lattice-matched InAlAs/InGaAs HEMT's", *Proc. Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials*, p. 87-90, Williamsburg (Virginia), 2000.
86. S. Fujimoto et al. "Ku-band ultra Low Noise MMIC Amplifier Using Pseudomorphic HEMTs" *Digest of Technical Paper, 1997 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium*, pp. 169-172.
87. Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления. Под ред. Д.В. Ди Лоренцо, Д.Д. Канделуола, Перевод с английского под ред. Г.В. Петрова, М., «Радио и связь», 1988 г., стр. 118.
88. Jong-Lam Lee, Jae Kyoong Mun and Haechon Kim A new self-aligned and T-shaped gate technology for GaAs power MESFETs "Solid-State Electronics", 1998, Vol. 42, №11, pp. 2063-2068.
89. C. Huang, A. Herbig, R. Anderson Sub-Half-micron GaAs FET's for Applications Though K-Band. "IEEE 1981 Microwave Symp. Digest", pp. 25-27.
90. L. D. Nguyen, A.S. Brown, M.A. Thompson and L. M. Jelloian, "50-nm self-aligned-gate pseudomorphic AlInAs/GaInAs electron mobility transistors", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 39, pp. 2007-2014, 1992.

91. 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.
92. 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.
93. 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.
94. 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.
95. A.S. Wakita, C.-Y. Su, H. Rohdin, H.-Y. Liu, A. Lee, J. Seeger and V. M. Robbins, "Novel high-yield trilayer resist process for 0,1 μm T-gate fabrication", J.Vac, Sci. Technol., В 13(6), pp. 2725-2728, 1995.
96. K.Shinohara, Y. Yamashita, K. Nikosaka et al. Ultra-short T-shaped gate fabrication technique for InP based HEMTs with high f_T (>300 GHz) and their MMIC applications. "GaAs 2000 Symposium. Paris", 2000, pp. 252-255.
97. Кувшинова, Н. А. Мощный полевой транзистор со смещенным к истоку Г-образным затвором / Н. А. Кувшинова, В. Г. Лапин, В. М. Лукашин, К. И. Петров // Радиотехника. – 2011. – № 11. – С. 90 – 93.
98. Лапин В. Г. Перспективы развития и применения DA-pHEMT в СВЧ МИС / В. Г. Лапин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017.– Вып. 1 (532). – С. 26 – 44.
99. Стандарт предприятия СМП ТСО.04.01СК-2009
100. ГОСТ 27.410 Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность.

101. РД 50-690-89 Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным.
102. РД 11.0929-94 Метод контроля температуры структуры изделий по собственному тепловому излучению с помощью микропирометров (ст.77).
103. Д.1.7 РД 11 336.938-83 Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность.
104. Д.1.8 Методика ЭТ-361 оценки соответствия ИЭТ СВЧ требованиям ; ТЗ по минимальной наработке на этапе ОКР (ред. П, 1988г)
105. ОСТ 11 0944-96 Методы измерения теплового сопротивления транзисторов, основанные на косвенных способах измерения температуры, (раздел 5, методы 4,5,6).
106. H.F.Cooke, "Precise technique finds FET thermal resistance," Microwave & RF, pp. 85-87, Aug. 1986.
107. H. Fukui, "Thermal Resistance of GaAs Field-Effect Transistors," Intern. Electron Devices Meeting Tech. Dig., 1980, p.p. 118-121.
108. Steady State Junction Temperatures of Semiconductor Chips. R.D. LINSTED, R.J.SURTY. IEEE Trans, on electron devices, vol.ED-19, №1, January 1972, p.p. 41-44.
109. ОСТ 11 0944-96. ОТРАСЛЕВОЙ СТАНДАРТ. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления.
110. К.В.Дудинов, В.М.Ипполитов, А.Б.Пашковский. Оценка размеров области тепловыделения в мощных полевых транзисторах с субмикронным затвором. Электронная техника.Серия 1, 2006г., стр.5-7.
111. К.В.Дудинов, В.М.Ипполитов, А.В.Климова, А.Б.Пашковский, И.В.Самсонова. Особенности тепловыделения в мощных полевых транзисторах. "Радиотехника", 2007, №3, стр.61-62.
112. П.В.Бережнова, А.Б.Пашковский, А.К.Ратникова, В.М.Лукашин. Оценка области нелокального тепловыделения в мощных гетероструктурных полевых

- транзисторах. Электронная техника.Серия!, СВЧ-техника, выпуск 4, 2007г., стр.21-24.
113. A.Sarua, a.o. Combined Infrared and Raman Temperature Measurements of Device Structures. CS Mantech Conference, April 24-27, 2006. Vancouver, British Columbia, Canada, p.p 179-182.
114. 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.
115. Бабинцев Д.В.,Королев А. Н., Климова А. В., Красник В.А., Лапин В.Г., Малыщик В. М., Манченко Л. В., Пчелин В. А., Трегубов В. Б. Язан В.Ю. Мощный твердотельный импульсный усилитель двухсантиметрового диапазона. Радиотехника №3, 2007г. Стр. 41-42.
116. 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. Трегубов, 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.
117. Ю. М. Богданов, В. Г. Лапин, А. М. Темнов, Ф. Е. Щербаков Монолитный двухпозиционный переключатель для диапазона частот 0,5...18ГГц, согласованный по всем каналам Электронная Техника. Сер.1. СВЧ - Техника, 2007, В.1(489). С. 33-37.
118. Ю. М. Богданов, В. А. Красник, В. Г. Лапин, В. А. Лукьянов, А. М. Темнов, 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.
119. Темнов А.М., Дудинов К.В., Богданов Ю.М., Крутов А.В., Красник В.А., Лапин В.Г., Щербаков С.В. Комплект унифицированных МИС СВЧ для многоканальных приемопередающих модулей АФАР X – диапазона Электронная. Техника. Сер.1. СВЧ - Техника, 2009, В.2(501). С. 31-44.

120. 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.
121. 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.
122. Н.А.Банов, В.И.Рыжий Численное моделирование нестационарных кинетических процессов в субмикронных полевых транзисторах с затвором Шоттки // Микроэлектроника, 1986, Т. 15, В. 6, С. 490-501.
123. Р. Хокни, Дж. Иствуд «Численное моделирование методом частиц», Москва, «Мир» 1987.
124. Минаков В.В., Москалюк В.А. Моделирование гетероструктурных полевых транзисторов методом частиц. Электронная техника Сер.1. Электроника СВЧ. 1989. № 2 (416). С.29-36.
125. Glisson T.H., Hauser J.B., Littlejon M.A. et.al. Monte-Carlo simulation of real-space electron transport in GaAs-AlGaAs heterostructures. J.Appl.Phys.1980. V.51.№10. P.5445-5449.
126. Килесса Г. В., Асанов Э. Э., Зуев С. А., Слипченко Н.И. Определение кинетических параметров полупроводниковой плазмы в GaAs методом Монте-Карло 23-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2013). Материалы конференции. С.131-132, 2013.
127. А.А.Кальфа, А.С.Тагер. Гетероструктуры с селективным легированием и их применение в полевых транзисторах СВЧ. Электронная Техника Серия 1, Электроника СВЧ, **12**(348), с. 26-38, (1980).

128. В.А.Николаева В.Д.Пищалко, В.И.Рыжий, Г.Ю.Хренов, Б.Н.Четверушкин Сравнение результатов расчетов субмикронного полевого транзистора с затвором Шоттки на основе квазигидродинамической и кинетической моделей // Микроэлектроника, 1988, Т. 17, В. 6, С. 504-510.
129. R.S.Pengelly, S.M.Wood, J.W.Milligan, S.T.Sheppard, A Review of GaN on SiC High Electron-Mobility Power Transistors and MMICs //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012 v.60, № 6, p.1764-1783.
130. C.S. Wu, F. Ren, S.J. Pearton, M. Hu, C.K. Pao, R.F. Wang. IEEE Trans. Electron. Dev., **42**, 1419, (1995).
131. F.Medidoub, B.Grimbert et al. Record combination of power-gain frequency and three-terminal breakdown voltage for GaN-on-Silicon devices //Appl. Phys. Express, 6 (2013) 044001.
132. D.Alquier, F.Cayrel et al. Recent progress in GaN power rectifier//Jap. Journ. Appl. Phys, 51 (2012), 01AG08-1.
133. К.Ю. Осипов Технология создания AlGaN/GaN/Si НЕМТ с длиной затвора 150 нм.//Сборник докладов 9 научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА, 2010 г. с. 223.
134. А.А.Кищинский Материалы 19-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". – Севастополь, Вебер, 2009, с.11–16.
135. А.Ф.Цацульников, В.В.Лундин, Е.Е.Заварин, М.А.Яговкина, А.В.Сахаров, С.О.Усов, В.Е.Земляков, В.И.Егоркин, К.А.Булашевич, С.Ю.Карпов, В.М.Устинов. Влияние параметров гетероструктур AlN/GaN/AlGaN и AlN/GaN/InAlN с двумерным электронным газом на их электрофизические свойства и характеристики транзисторов на их основе. ФТП, т.**50**, в.10, 1401 (2016).
136. К.С.Журавлев, Т.В.Малин, В.Г.Мансуров, В.Е.Земляков, В.И. Егоркин, Я.М.Парнес. Нормально закрытые транзисторы на основе in situ пассивированных гетероструктур AlN/GaN/ Письма в ЖТФ, **42**, (14), 72 (2016).

137. К.М.Томош, А.Ю.Павлов, В.Ю.Павлов, Р.А.Хабибуллин, С.С.Арутюнян, П.П.Мальцев. Исследование процессов изготовления НЕМТ AlGaN/AlN/GaN с пассивацией Si₃N₄ in situ. ФТП, т.50, в.10, 1434 (2016).
138. И.О.Майборода, А.А.Андреев, П.А.Перминов, Ю.В.Федоров, М.А.Занавескин. Селективный рост невжигаемых омических контактов к двумерному электронному газу в транзисторах с высокой подвижностью электронов на основе гетеропереходов GaN/AlGaN методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Письма в ЖТФ, **40**, (11), 80 (2014).
139. 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.
140. Shur M. Influence of Nonuniform Field Distribution on Frequency Limits of GaAs Field-Effect Transistors // Electronics Letters. 1976, V.12, № 23, P.615-616.
141. A.Cappy, B.Carnez, R.Fauquembergues, G.Salmer, E.Constant Comparative Potential Performance of Si, GaAs, GaInAs, InAs Submicrometer-Gate FET,s // IEEE Trans. Electron. Dev. 1980, v.27, № 11, P.2158-2160.
142. B. E. Foutz, S. K. O’Leary, M. S. Shur, L. F. Eastman Transient electron transport in wurtzite GaN, InN, and AlN// J. Appl. Phys. 1999, v.85, №11, 7727-7734.
143. А.В. Гарматин Программа моделирования методом Монте-Карло нестационарных процессов разогрева электронов электрическим полем в полупроводниках// Электронная техника Сер.1. Электроника СВЧ, 1985 № 3 (377). С.66.
144. B. Carnez, A. Cappy, A. Kaszinski, E. Constant, and G. Salmer, “Modeling of a submicrometer gate field-effect transistor including effects of nonstationary electron dynamics,” J. Appl. Phys., vol. 51, no. 1, Jan. 1980.
145. Кальфа А.А., Тагер А.С. Гетероструктуры с селективным легированием и их применение в полевых транзисторах СВЧ // Электронная Техника Сер.1, Электроника СВЧ, 1980, В. 12(348), С. 26 – 38.

146. A New Field-Effect Transistor with Selectively Doped GaAs/n-Al_xGa_{1-x}As Heterostructures / T. Mimura, S. Hiyamizi, T. Fuji, K.Numbu // Jap. Journ. Appl. Phys. 1980, V.19, № 5, P. L225 – L227.
147. High – Electron Mobility Transistors with Selectively Doped GaAs/n-AlGaAs Heterojunction / T. Mimura, S. Hiyamizi, H. Hashimoto, M. Fukuta // IEEE Trans. on Electron Dev., 1980, V. ED-27, № 11, P. 2197.
148. Климова А.В. Нелокальный разогрев электронов в транзисторных структурах с субмикронным рельефом поверхности //15-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2005). Материалы конференции. Севастополь: "Вебер", с.476-477, 2005.
149. Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Соколов А.Б. “Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов”// Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 17. С. 84–89.
150. 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.
151. 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 рНЕМТ транзисторах”// Письма в ЖТФ, 2016, Т. 42, В. 16, С.41 – 47.
152. И.С.Васильевский, А.Н.Виниченко, Н.И.Каргин. 8-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. Мокеровские чтения. 24.05.2017. Тезисы докладов. с. 28-29.
153. Н.А.Кувшинова, В.Г.Лапин, В.М.Лукашин, К.И.Петров. Мощный полевой транзистор со смещенным к истоку Г-образным затвором. Радиотехника **11**, 90 (2011).

154. А.В.Климова, В.М.Лукашин, А.Б.Пашковский. Поперечный пространственный перенос в полевых транзисторах на гетероструктурах с селективным легированием и границы применимости квазигидродинамических моделей. *Физика и Техника Полупроводников*, 2009, Т.43, В.1, стр. 113-118.
155. Тематические базы данных ФТИ им. А.Ф. Иоффе.
156. А.К. Saxena *J. Phys. C.*, **13**, pp 4322-4334 (1980).
157. З.С. Грибников, О.Э. Райчев. *ФТП* **23**, 2171 (1989).
158. Патент РФ на полезную модель №80069 по заявке № 2008133793. Приоритет от 19.08.2008. Гетероэпитаксиальная структура для полевых транзисторов// Е.И.Голант, К.С.Журавлев, В.Г.Лапин, В.М.Лукашин, А.Б.Пашковский, Ю.Н.Свешников.
159. CHANG Yu-Chun, Nailin Luo, Y. Wang, WANG Hai-Song, WANG Jian-Gang, DU Guo-Tong. A Novel GaAs/InGaAs/AlGaAs Structure of Modulation-Doped Field-Effect Transistors with High Transconductances. *Chin.Phys.Lett*, v. 19, No. 4, 588 (2002).
160. J. Zou, H. Dong, A. Gopinath, and M. S. Shur, *IEEE Trans. Electron Devices*, *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-39**, 250 (1992).
161. В.А.Николаева В.Д. Пищалко, В.И.Рыжий, Г.Ю.Хренов, Б.Н. Четверушкин. *Микроэлектроника*. **17**, 504 (1988).
162. В.Е.Чайка. Двумерная двухтемпературная модель полевого транзистора с затвором типа барьера Шоттки. *Техн. Электродинамика*, в. 3, с. 85-91 (1985).
163. Я.Б.Мартынов, А.С.Тагер. *Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ*, 7(413), 14, (1988).
164. Г.З.Гарбер. *Радиотехника и Электроника*, **48**, 125 (2003).
165. K.Blotekjar Transport Equations for Electros in Two-Valley Semiconductors // *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 1970, V. 17 № 1, P. 38-47.
166. В.Л.Бонч-Бруевич, И.П.Звягин, А.Г.Миронов Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках // Москва, Наука, 1972, С. 66.
167. С.М.Snowden, D.Loret Two-Dimensional Hot-Electron Models for Short-Gate_Length GaAs MESFET's// *IEEE Trans. Electron. Dev.* 1987, v.34, P.212-223.

168. Г.З.Гарбер Квазигидродинамическое моделирование гетероструктурных полевых транзисторов //Радиотехника и Электроника, 2003, Том 48, № 1, С. 125-128.
169. Я.Б. Мартынов «Специальный вид граничных условий для системы уравнений низкотемпературной полупроводниковой плазмы»// ЖВМ и МФ, 1999, т. 39, №2, стр. 309-314.
170. G. Z. Garber «Quasi-hydrodynamic modeling of heterostructure field-effect transistors», Journal of Communications Technology and Electronics, vol. 48, pp. 114–117, Jan. 2003.
171. Пашковский А.Б. Влияние инерционности изменения импульса на нелокальный разогрев электронов в полупроводниковых СВЧ-приборах // Электронная техн. Сер.1, Электроника СВЧ вып.5 (399) 1987, С.22-26.
172. А.А.Кальфа, А.Б.Пашковский, А.С.Тагер Влияние поперечного пространственного переноса электронов на высокочастотные характеристики гетероструктурных полевых транзисторов с селективным легированием // Микроэлектроника 1991, Т.20, вып.4, с.383-391.
173. А.А.Кальфа, А.Б.Пашковский Пространственный перенос двумерных электронов в структуре металл – $Al_x Ga_{1-x}As-GaAs$ с селективным легированием Физика и Техника Полупроводников, 1990, Т.24. В.3, С.521-526.
174. Кальфа А.А., Пашковский А.Б. Пространственный перенос электронов в полевых транзисторах на гетероструктурах с селективным легированием. ФТП 1990. Т.24, В.7. С.1187-1189.
175. В.Б.Горфинкель, С.Г.Шофман Феноменологическая модель динамики разогрева электронов в многодолинных полупроводниках// ФТП, 1985, Т.19, В.1, с. 83-87.
176. А.А.Кальфа, А.Б.Пашковский, А.С.Тагер Нелокальные и диффузионные эффекты в полевых транзисторах с субмикронным затвором // Радиофизика, 1985, Т. 28 № 12, С. 1583-1589.
177. А.А.Кальфа Нелокальные эффекты в гетероструктурных полевых транзисторах //ФТП, 1986, т. 20, В.3, с. 468-471.

178. Кальфа А.А. Характеристики гетероперехода в гетероструктуре с селективным легированием. ФТП, 1985, т. 16, В.6, с. 1025-1029.
179. R.Dingle, H.L.Stormer, A.C.Gossard, W.Wigman Electron Mobilities in Modulated – Doped Semiconductors Heterojunction Superlaties // Appl. Phys. Letters, 1978, v.33, №7, pp.665-667.
180. H.L.Stormer, R.Dingle, A.C.Gossard a.o. Two-Dimensional Electron Gas at Semiconductor - Semiconductor Interface // Solid State Commun. 1978, v.29, №10, pp.705-709.
181. Т.Андо, А.Фаулер, Ф.Стерн Электронные свойства двумерных систем // Москва «Мир» 1985, 416 с.
182. А.А.Кальфа, А.Б.Пашковский Двумерный электронный газ в пространственно неоднородной потенциальной яме // ФТП, 1988, Т.22. В.11. С. 2090-2092.
183. X. Mei; W. Yoshida, M. Lange, J. Lee et.al // IEEE Electron Device Letters, 2015, V.36, №4, p.327 – 329.
184. G. Moschetti, A. Leuther, H. Maßler, B. Aja et.al //IEEE Microwave and Wireless Components Letters 2015, V.25, №9, p.618 – 620.
185. Y. Campos-Roca; A. Tessmann; B. Amado-Rey; S. Wagner et.al//IEEE Microwave and Wireless Components Letters 2014, V.24 , №11, p.787 – 789.
186. А.Б. Пашковский “Оценка влияния полупроводниковой структуры на шумовые характеристики гетероструктурных полевых транзисторов” // Микроэлектроника, 1993, Т.22, В.5, С.26-32.
187. Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Голант Е.И., Капралова А.А. “Перспективы развития мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием” // ФТП. 2014. Т. 48. В. 5. С. 684–692.
188. 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.

189. И.С.Васильевский, А.Н.Виниченко, Н.И.Каргин. 8-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. Мокеровские чтения. 24.05.2017. Тезисы докладов. с. 28-29.
190. А.С. 897062 (СССР). Полевой транзистор. А.С.Тагер, А.А.Кальфа. Приоритет от 0.3.09.1980.
191. Two – Dimensional Electron GaAs MESFET Inversion Channels / D. Delagebeaudeuf, P. Delescluse, P.Etinne a.o. //Electron Lett., 1980, V. 16, № 17, P. 667 – 668.
192. D. Delagebeaudeuf, N.T.Linch Chage Control of the Heterojunction Two Dimensional Electron Gas for MESFET Application // IEEE Trans. on Electron Dev., 1981, V. ED-28, № 7, P. 790 – 795.
193. Г.Б. Галиев, И.С. Васильевский, Е.А. Климов, А.Н. Клочков, Д.В. Лаврухин, С.С. Пушкарев, П.П. Мальцев Особенности фотолюминесценции НЕМТ-наногетероструктур с составной квантовой ямой InAlAs/InGaAs/InAs/InGaAs/InAlAs // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49. – Вып. 2. – С. 241 – 248.
194. А. Шиленас, Ю. Пожела, К. Пожела, В. Юцене, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, С.С. Пушкарев, Е.А. Климов Максимальная дрейфовая скорость электронов в селективно легированных гетероструктурах InAlAs/InGaAs/InAlAs с введенной InAs-вставкой //Физика и техника полупроводников, 2013, том 47, вып. 3, С.348 – 352.
195. Nicolas C., Cirillo Jr., M.S.Shur, Jonatan K.A. //IEEE Electron Dev. Lett. 1986, v/EDL-7, № 2, p.71 – 74.
196. А.М.Крещук, Е.П.Лаурс, С.В.Новиков, и др. // ФТП, 1990, т.24, в.6 с. 1145 – 1147.
197. T. H. Glisson et al., “Monte Carlo simulation of real-space electron transfer in GaAs-AlGaAs heterostructures,” J. Appl. Phys., vol. 51, no. 10, pp. 5445-5449, 1980.

198. R. Sakamoto, K. Akai, M. "Inoue Real-Space Transfer and Hot-Electron Transport Properties in III-V Semiconductor Heterostructures" // IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 36, NO. 10, OCTOBER 1989, p.2344 – 2352.
199. E. Kobayashi, C. Hamaguchi, T. Matsuoka, K. Taniguchi "Monte Carlo Study of Hot-Electron Transport in an InGaAs/InAlAs Single Heterostructure" // IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 36, NO. 10, OCTOBER 1989, p.2353-2360.
200. Харрисон У. Электронная структура и свойства твердых тел. Физика химической связи: пер. с англ. - М.: Мир, 1983. - Т. 2. - 332 с.
201. В.И.Фистуль Сильно легированные полупроводники // Издательство «Наука», Москва 1967 г, 415 с.
202. Лукашин В. М., Пашковский А. Б., Журавлев К. С., Торопов А. И., Лапин В.Г., Капралова А. А. (Маковецкая) "Малосигнальные СВЧ характеристики ДА-НЕМТ" // Материалы 25 Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" 2015. Севастополь: "Вебер", С. 95-96.
203. А.Б.Пашковский, А.С.Тагер Влияние близких к затвору n+ - областей на характеристики полевых СВЧ транзисторов Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1987, В.7 (401). С. 29-32.
204. А.Б.Пашковский, А.С.Тагер Оценка характеристик полевых СВЧ транзисторов с планарным легированием Электронная Техника Сер.1 Электроника СВЧ, 1988, В.3(407). С. 28-32.
205. Шварц Н.З. Линейные транзисторные усилители СВЧ. – Москва: Советское радио. – 1980.
206. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, А.А. Капралова (Маковецкая) "Мощные гетероструктурные полевые транзисторы, работающие при нулевом смещении на затворе" // Сборник трудов всероссийской конференции "Электроника и микроэлектроника СВЧ". 2014. Санкт-Петербург. СПбГЭТУ, С.111 – 113.

207. Лукашин В. М., Пашковский А. Б., Журавлев К. С., Торопов А. И., Лапин В. Г., Капралова А. А. (Маковецкая) “Мощные гетероструктурные полевые транзисторы, работающие при нулевом смещении на затворе” // Материалы 24 Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" 2014. Севастополь: "Вебер", С. 79-80.
208. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, С.В. Щербаков, А.А. Капралова (Маковецкая) «Полевые транзисторы на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием» // Сборник трудов всероссийской конференции “Электроника и микроэлектроника СВЧ”. 2015. Санкт-Петербург. СПбГЭТУ, С.19 – 23.
209. И.С.Васильевский, А.Н.Виниченко, Н.И.Каргин. 8-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. Мокеровские чтения. 24.05.2017. Тез. докладов. с. 28-29.
210. Протасов Д.Ю., Гуляев Д.В., Бакаров А.К., Торопов А.И., Ерофеев Е.В., Журавлев К.С. . Увеличение насыщенной скорости дрейфа электронов в рНЕМТ-гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием Письма в ЖТФ, 2018, том 44, вып. 6, с.77 -84.
211. Богданов Ю.М., Пашковский А.Б., Тагер А.С. "Зависимость низкочастотных флуктуаций входной емкости полевого транзистора от профиля легирования канала" // Микроэлектроника, 1993, Т 22, В.2, С.15-19.
212. Богданов Ю.М., Пашковский А.Б., Тагер А.С. "Полевые транзисторы с низкой модуляционной чувствительностью для малошумящих СВЧ устройств"//Радиотехника и Электроника, 1993, Т 33, В.2, С. 346-355.
213. Королев А.Н., Климова А.В., Красник В.А., Ляпин Л.В., Малыщик В.М., Манченко Л.В., Пчелин В.А., Трегубов В.Б. Мощные корпусированные внутрисогласованные транзисторы S-, C-, X- и Ku-диапазонов длин волн. Радиотехника №3, 2007г. С.53-56.
214. Бабинцев Д.В., Королев А.Н., Климова А.В., Красник В.А., Лапин В.Г., Малыщик В.М., Манченко Л.В., Пчелин В.А., Трегубов В.Б. Язан В.Ю.

- Мощный твердотельный импульсный усилитель двухсантиметрового диапазона. Радиотехника. №3. 2007 г. С. 41-42.
215. Манченко Л.В., Пчелин В.А., Трегубов В.Б. Двухкаскадный усилитель мощности X – диапазона на гетероструктурных полевых транзисторах ФГУП «НПП «Исток». Материалы 20-й Международной Крымской конференции «СВЧ - техника и телекоммуникационной технологии». Севастополь 2010 г. С. 127-128.
216. Пчелин В.А., Корчагин И.П., Малыщик В.М., Галдецкий А.В., Манченко Л.В., Капралова А.А. Двухкаскадный усилитель X-диапазона с выходной мощностью 17 Вт на элементной базе ФГУП «НПП «Исток». Материалы 21-й Международной Крымской конференции «СВЧ - техника и телекоммуникационной технологии». Севастополь 2011г. С. 129-130.
217. К.В. Дудинов, В.М. Ипполитов, А.В. Климова, А.Б. Пашковский, И.В. Самсонова. “Особенности тепловыделения в мощных полевых транзисторах”// Радиотехника, 2007 г. No 3, с. 60-62.
218. К.В. Дудинов, В.М. Ипполитов, А.Б. Пашковский "Особенности нелокального тепловыделения в мощных полевых транзисторах с субмикронным затвором "16-я Международная Крымская конференция "СВЧ - техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2006). Севастополь, 11-15 сентября 2006г.: Материалы конференции. Севастополь: "Вебер", с.226-227, 2006.
219. Бережнова П.В., Лукашин В.М., Ратникова А.К., Пашковский А.Б. “Оценка области нелокального тепловыделения в мощных гетероструктурных полевых транзисторах”// Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2007, В.4 (492), С.21 - 24.
220. Бережнова П.В., Лукашин В.М., Пашковский А.Б. “Оценка размеров области тепловыделения в мощных полевых транзисторах на гетероструктурах с селективным легированием ” 17-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2007). Севастополь, 10-14 сентября 2007г.: Материалы конференции. с. 119-120.

221. С. Зи. Физика работы полупроводниковых приборов. Москва «Мир» 1984, Т.1, с. 360.
222. А.А. Воробьев, Е.В. Воробьева, А.В. Галдецкий Моделирование теплового режима мощных транзисторов и МИС и новый метод монтажа кристаллов. Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2011. – Вып. 3 (510). – С. 37-41.
223. А.А. Воробьев, А.В. Галдецкий. О возможности создания эффективного теплоотвода мощных СВЧ-транзистора с помощью структуры со стоп-слоем. Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2011. – Вып. 3 (510). – С. 42-54.
224. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, В.Г. Лапин, С.В. Щербаков, А.А. Капралова, К.С. Журавлев, А.И. Торопов “Мощные гетероструктурные полевые транзисторы с донорно – акцепторным легированием, эффективно работающие при нулевом смещении на затворе”// Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2014, В.3(522), С. 5-14.
225. И.В. Куликова, А.Б. Пашковский, Н.К. Приступчик «Тепловые режимы мощных полевых транзисторов с донорно-акцепторным легированием» Электроника и микроэлектроника СВЧ, V Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 30 мая-2 июня 2016 г. Сборник трудов конференции. Том 1, С.238 – 241.
226. Н.А.Брагина, А.Б.Пашковский, А.С.Тагер Оценка изменения характеристик полевых транзисторов при охлаждении до 77 К Микроэлектроника, 1991, Т.20, В.3, С.268-273.
227. P.C.Chao et.al. A new high power GaN-on-diamond HEMT with low-temperature bonded substrate technology, CS MANTECH Conference Digest, 2013, p. 179-182.
228. P.C. Chao, Kanin Chu, Jose Diaz, Carlton Creamer, Scott Sweetland, Ray Kallaher, Craig McGray, Glen D. Via and John Blevins GaN-on-Diamond HEMTs with 11W/mm Output Power at 10GHz MRS Advances / Volume 1 / Issue 02 / January 2016, pp 147 - 155.
229. Ogyun Seok, Young-Hwan Choi, Minki Kim, Jumi Kim, Byungyou Hong and Min-Koo Han AlGaIn/GaN Schottky Barrier Diodes Employing Diamond-like

- Carbon passivation // CS MANTECH Conference, May 17th-20th, 2010, Portland, Oregon, USA, p.229.
230. Гиппиус А.А. и др. Патент № 2244983 С1 (RU) от 14.07.2003.
231. David Altman Improving thermal performance of DoD systems. Engineering the thermal properties of micro and nanomaterials// Raytheon Technology Today, 2012, №1, p. 18.
232. A. Jezowski, B.A. Danilchenko, M. Boc'kowski, I. Grzegory, S. Krukowski, T. Suski, T. Paszkiewicz. Thermal conductivity of GaN crystals in 4.2–300 K range // Solid State Communications 128 (2003) p. 69–73.
233. O. Madelung. Semiconductors data handbook // 2004. XIV. 691 p.
234. 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", 314.
235. 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.
236. Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Голант Е.И., Капралова А.А. (Маковецкая) “Особенности электронного транспорта в полевых транзисторах на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием” // Материалы 23 Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" 2013. Севастополь: "Вебер", с. 122-124.
237. L.J. Kushner, "Estimating Power Amplifier Large Signal Gain", Microwave Journal, 8, pp. 87—102, 1990.
238. Техника оптической связи. Фотоприемники. Под ред. У. Тсанга, Москва, Мир, 1988.

239. E. Chigaeva and W. Walthes, "Determination of small-signal parameters of GaN-based HEMTs," in Proc. IEEE/Cornell High Performance Devices Conf., 2000, pp. 115–122.
240. Y.F. Wu; A. Saxler; M. Moore; R.P. Smith; S. Sheppard; P.M. Chavarkar; T. Wisleder; U.K. Mishra; P. Parikh. 30-W/mm GaN HEMTs by field plate optimization // IEEE Electron Device Letters, 2004, v.25, № 3, p.117- 119.
241. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, В.Г. Лапин, А.А. Капралова (Маковецкая), К.И. Петров, Е.И. Голант, К.С. Журавлев, А.И. Торопов "Перспективы использования наноструктур с донорно-акцепторным легированием в производстве мощных полевых транзисторах" // Тезисы докладов 10 Международной научно-практической конференции «Нанотехнологии – производству 2014». 2014. г. Фрязино Московской обл., С.52-54.
242. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, В.Г. Лапин, А.А. Капралова (Маковецкая), К.И. Петров, Е.И. Голант, К.С. Журавлев, А.И. Торопов "Особенности физических процессов в полевых транзисторах на наноструктурах с комбинированным типом легирования" // Тезисы докладов 10 Международной научно-практической конференции «Нанотехнологии – производству 2014». 2014. г. Фрязино Московской обл., С.54-55.
243. Kazarinov R.F., Luryi S., Charge injection over triangular barriers in unipolar semiconductor structures, Appl. Phys. Lett., 38, 810 (1981).
244. Malik R.J., AuCoin T.R., Ross R.L., Board K., Wood C.E.C., Eastman L.F., Planar doped barriers in GaAs by molecular beam epitaxy, Electron Lett., 16, 836-837 (1980).
245. И.А. Баранов, А.В. Климова, Л.В. Манченко, О.И. Обрезан, А.Б. Пашковский. Радиотехника, № 3, 34 (2006).
246. И.О. Майборода, А.А. Андреев, П.А. Перминов, Ю.В. Федоров, М.Л. Занавескин Селективный рост невжигаемых омических контактов к двумерному электронному газу в транзисторах с высокой подвижностью

- электронов на основе гетеропереходов GaN/AlGaN методом молекулярно-пучковой эпитаксии // Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 11, С.80-86.
247. Nidhi, Dasgupta S., Lu J., Speck S., James S., Mishra U.K. Self-Aligned N-Polar GaN/InAlN MIS-HEMTs With Record Extrinsic Transconductance of 1105 mS/mm // IEEE Electron Device Letters. 2012. V. 33. N 6. P. 794–796.
248. Zheng Z., Seo H., Liang Pang L., Kim K. Nonalloyed ohmic contact of AlGaN/GaN HEMTs by selective area growth of single-crystal n⁺ - GaN using plasma assisted molecular beam epitaxy // Phys. Status Solidi. A. 2011. V. 208. N 4. P. 951–954.
249. Pang L., Krein P., Kim K., Lee J.-H., Kim K. High-current AlGaN/GaN high electron mobility transistors achieved by selective-area growth via plasma-assisted molecular beam epitaxy // Phys. Status Solidi. A. 2014. V. 211. N 1. P. 180–183.
250. Recht F., McCarthy L., Ragan S., Chakraborty A., Poblenz C., Corrion A., Speck J.S., Mishra U.K. Nonalloyed ohmic contacts in AlGaN/GaN HEMTs by ion implantation with reduced activation annealing temperature // IEEE Electron Device Letters. 2006. V. 24. N 4. P. 205–207.
251. 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.
252. В.Г. Лапин. Возможности и перспективы использования Г-образного затвора для изготовления полевых транзисторов СВЧ // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 2(537). – С. 52-61.
253. В.Г. Лапин. Перспективы развития и применения DA-pHEMT в СВЧ МИС // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 1, (532). – С. 26-44.
254. 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.
255. А.А. Маковецкая, Пчелин В.А., Лапин В. Г., Пашковский А. Б., Лукашин В. М., Щербаков С.В., Журавлев К. С., Торопов А. И. “GaAs ВСТ X-диапазона с удельной выходной мощностью более 1 Вт/мм” // Материалы 27 Международной Крымской конференции "СВЧ - техника и телекоммуникационные технологии" 2017. Севастополь: "Вебер", с. 71-77.
256. А.А. Маковецкая, Д.В. Калита, В.А. Пчелин, В.Г. Лапин, А.Б. Пашковский, В.М. Лукашин, С.В. Щербаков, К.С. Журавлев, А.И. Торопов «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(538), С. 25-31.
257. D. Fanning, L. Witkowski, J. Stidham, H.-Q. Tserng, M. Muir and P. Saunier Dielectrically defined optical T-gate for high power GaAs pHEMTs // GaAs MANTECH Conference.
258. Ф. Сечи, М. Буджатти «Мощные твердотельные СВЧ-усилители» под редакцией д.т.н. А. А. Борисова, с. 218-224, Техносфера, Москва, 2016.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АФАР – активная фазированная антенная решетка

СВЧ – сверхвысокочастотная.

ЭКБ - электронная компонентная база.

ПТШ - полевые транзисторы с барьером Шоттки.

pHEMT - (pseudomorphic high electron mobility transistor) – СВЧ транзисторы на основе псевдоморфных AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктур.

DpHEMT – pHEMT транзистор с двухсторонним наполнением канала электронами за счет легирования донорами широкозонных слоев, сформированных выше и ниже слоя канала.

DApHEMT – DpHEMT транзистор с локализуемыми потенциальными барьерами, сформированными зарядами доноров и акцепторов в AlGaAs-слоях, сформированных выше и ниже слоя канала и имеющими p-i-n профиль легирования.

(δ : Si) - обозначение сверхтонкого легированного примесью кремния слоя полупроводника.

(δ : A) - обозначение сверхтонкого легированного акцепторной примесью слоя полупроводника.

СР – сверхрешетка.

ГДМ – гидродинамическая модель.

ТМ – температурная модель.

КЯ – квантовая яма.

ПТ ГСЛ – полевой транзистор на основе гетероструктуры с селективным легированием.

q - заряд электрона.

\vec{v}_i - скорость электронов, находящихся в долине с номером « i ».

ε_i - энергия электронов, находящихся в долине с номером « i ».

ε_p - энергия оптического фонона.

T_i - температура электронов, находящихся в долине с номером « i ».

m^* - эффективная масса электронов.

\vec{Q}_i - поток тепла, вызванный переносом кинетической энергии между электронами (теплопроводностью электронного газа).

I_{ni}, I_{pi}, I_{ei} - гидродинамические генерационно - релаксационные члены в уравнениях для концентрации электронов, их импульса и энергии в каждой из долин, связанные с интегралами столкновений в кинетическом уравнении Больцмана.

k_B - постоянная Больцмана.

τ_p - гидродинамическое время релаксации импульса электронов.

τ_ε - гидродинамическое время релаксации кинетической энергии электронов.

l_p, l_ε - длины релаксации импульса и кинетической энергии электронов.

p - число долин в узкозонном, и в широкозонном полупроводниках (в ГДМ).

$L_{i,j}$ - толщины областей слоев гетероперехода, занятых электронами (в ГДМ).

$v_s(\varepsilon), E_s(\varepsilon)$ - статические значения дрейфовой скорости электронов и напряженности электрического поля, соответствующие некоторой кинетической энергии электронов ε (в ГДМ).

$\tilde{\epsilon}$ – кинетическая энергия, переносимая электроном при переходе через потенциальный барьер гетероперехода (в ГДМ).

μ, n – подвижность и концентрация электронов.

n_s – поверхностная концентрация электронов.

$V_{1,2}$ – изгиб зон проводимости.

Σ_i – собственные значения кинетической энергии электронов (соответствующей поперечной компоненте импульса).

i – номер размерно – квантовой подзоны ($i=0,1\dots$).

N_{D1}, N_{D2} – концентрации доноров в слоях, образующих гетеропереход (в ГДМ).

N_{sp} – концентрация доноров в слое спейсера (в ГДМ)

l_1, a_2, d_2 – ширина потенциальной ямы для электронов в канале, широкозонного слоя, примыкающего к слою канала и спейсера.

$\kappa_{1,2}$ – диэлектрическая проницаемость узкозонного и широкозонного слоев, образующих гетеропереход (в ГДМ).

n_{si} – поверхностная плотность электронов в размерно – квантовой подзоне с номером i , ($n_s = \sum_i n_{si}$).

$k_B T$ – тепловая энергия.

E_F – энергия Ферми.

φ_B – высота барьера Шоттки.

U_g – напряжение на затворе.

$\varphi(x)$ – распределение потенциала по продольной координате в канале транзистора (от истока к стоку).

$E_{y1,2}$ – напряженности поперечных электрических полей на границе гетероперехода.

$E_{x1,2}$ – напряженности продольных (направленных от истока к стоку) электрических полей на границе гетероперехода.

E_{g1} – ширина запрещенной зоны в узкозонном слое канала.

δ_1 – положение дна валентной зоны относительно неравновесного уровня Ферми (в ГДМ).

Δ - величина разрыва дна зоны проводимости на границе гетероперехода.

L_2 – расстояние от границы гетероперехода на которое электроны с энергией ε_1 проникают в широкозонный материал (в ГДМ).

h_δ - толщина сильнолегированного слоя широкозонного материала у спейсера (в ГДМ).

N_δ .- концентрация доноров в слое h_δ .

I_D, I_d – ток стока в транзисторе.

$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial U_g}$ - крутизна транзистора.

U_d – напряжение на стоке транзистора.

U_g – напряжение на затворе транзистора.

E_s – напряженность электрического поля, при которой статическая дрейфовая скорость электронов имеет максимальное значение.

Q_s – плотность источников тепла (плотность мощности тепловыделения).

$n_{s1,2}$ – поверхностные плотности электронов в узкозонном и в широкозонном слоях гетероперехода.

L_{sg} – расстояние между истоком и затвором.

L_{gd} – расстояние между затвором и стоком.

L_g – длина основания затвора.

W_g – ширина затвора.

h – высота канала.

f_i - максимальная частота усиления по току.

УМ – усилитель мощности.

ВАХ –вольтамперная характеристика.

КПД – коэффициент полезного действия.

(DA)-DpHEMT – DpHEMT транзистор с локализуемыми потенциальными барьерами, сформированными зарядами доноров и акцепторов в AlGaAs-слоях, сформированных выше и ниже слоя канала и имеющими p–i–n профиль легирования.

ВСТ – внутрисогласованный транзистор.

$\hbar\omega$ – энергия оптического фонона.

f_i - максимальная частота усиления по току.

L_g – длина основания затвора.

L - индуктивность затвора, индуктивность соединительных проволок припаянных к затвору транзистора.

L_d –индуктивность стока, индуктивность соединительных проволок припаянных к стоку транзистора.

2D, 3D – двумерный, трехмерный.

v_D – средняя дрейфовая скорость электронов под затвором.

μ, n - подвижность и концентрация электронов.

n_s - поверхностная плотность электронов.

ε – диэлектрическая проницаемость, энергия электронов.

КЯ – квантовая яма.

E_C – значение энергии дна зоны проводимости.

E_V – значение энергии потолка валентной зоны.

ИФП СО РАН – Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук.

СПб АУ НОЦНТ РАН – Санкт-Петербургский академический университет - научно-образовательный центр нанотехнологий Российской академии наук (Академический университет).

$P_{\text{входа}}, P_{\text{in}}$ – СВЧ мощность, подаваемая на входной контакт прибора.

$P_{\text{выхода}}, P_{\text{out}}$ – СВЧ мощность, снимаемая с выходной контакта прибора.

K_p – коэффициент усиления по мощности.

$I_{\text{стока}}, I_{\text{ds}}$ – ток стока.

$U_{\text{стока}}, U_d$ – напряжение на стоке транзистора.

U_g – напряжение на затворе транзистора.

F_{min} – минимальный коэффициент шума.

K_y – коэффициент усиления по току.

W_g – ширина затвора.

q – заряд электрона.

v – скорость электронов.

m^* – эффективная масса электронов.

E – напряженность электрического поля.

τ_p – гидродинамическое время релаксации импульса электронов.

τ_ε – гидродинамическое время релаксации энергии электронов.

$v_s(\varepsilon), E_s(\varepsilon)$ – статические значения дрейфовой скорости электронов и напряженности электрического поля, соответствующие некоторой кинетической энергии электронов ε (в ГДМ).

τ – время перехода между слоями.

$\mu(\varepsilon)$ – подвижность электронов, зависящая от их энергии.

G_{\max} – максимально возможный коэффициент усиления при двухстороннем согласовании транзистора.

K – коэффициент устойчивости транзистора.

ε – кинетическая энергия, переносимая электроном при переходе через потенциальный барьер гетероперехода (в ГДМ).

kT – тепловая энергия.

E_F – энергия Ферми.

φ_B – высота барьера Шоттки.

U_g – напряжение на затворе.

$\varphi(x)$ – распределение потенциала по продольной координате в канале транзистора (от истока к стоку).

$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial U_g}$ – крутизна транзистора.

E_s – напряженность электрического поля, при которой статическая дрейфовая скорость электронов имеет максимальное значение.

Q_s – плотность источников тепла (плотность мощности тепловыделения).

$n_{s1,2}$ – поверхностные плотности электронов в узкозонном и в широкозонном слоях гетероперехода.

$L_{1,2}$ – эффективная толщина узкозонного и широкозонного слоев гетероперехода с учетом теплового разогрева.

Керамика БСТ – полупроводниковая подложка, изготовленная из сочетания

TGF2021-04 – мощный полевой GaAs транзистор, производимый фирмой

TriQuint.

МИС – монолитная интегральная схема.

Курс ТГ-5, ЗП612 А-5 – транзисторы средней мощности, производимые АО «НПП «Исток» им. Шокина»

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 ВНЕДРЕНИЕ

Разработанные методы наклонного напыления и очистки поверхности использованы при разработке параметрического ряда транзисторов (ЗП612 А,Б,В ЗП976 А,Б,В,Г,Д, «Плафон» «Полет»), выпускаемых серийно.

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

Результаты работы использовались в ОКР «Ока», «Озеро», «Орлон», «Обряд», «Стриж», «Омуль», «Обочина», «Отвес-3», «Гвоздика», «Книгоед», «Венец», «Самолет», «Сальвия», «Героиня» «Многоцветник-30», «Модуль СВЧ» (ИФУС) «Модерн-ТОР-ТТУ», «Долговечность-02-ТТУ», «Акваланг-ТОУ», «Овалет-М1-ТТУ», «Триумф-УМЕ», «Помеха-ТТУ».

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

ПРИЛОЖЕНИЕ 3 СПИСОК ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЯ

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 рHEMT 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, том 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 Х-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 двухпозиционный 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. Трегубов, 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. Ноздрин, 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. Ноздрин, 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 – 2013 "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 DA-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 X – диапазона на основе транзистора на гетероструктуре с донорно – акцепторным легированием” Электроника и микроэлектроника СВЧ, VI Всероссийская конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 29 мая – 1 июня 2017 г. Сборник статей конференции С.192 – 195.
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 X-диапазона с удельной выходной мощностью более 1 Вт/мм” 27-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2017). Севастополь, Крым, Россия. 10—16 сентября 2017г.: Материалы конференции. С. 71 – 77.
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-DrHEMT” // 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.

Личный вклад автора: 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.