

Экз. №

На правах рукописи



МАКОВЕЦКАЯ Алёна Александровна

УДК.621.382.323

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНОВ
В ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ
С ДОНОРНО–АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
СВЧ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ**

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

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

г. Фрязино 2018 г.

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

Научный руководитель:

д. ф.-м.н. **Пашковский Андрей Борисович**

Официальные оппоненты:

Ильичёв Эдуард Анатольевич, д.ф.-м.н., профессор, и. о. начальника лаборатории Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

Сизов Владимир Евгеньевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Фрязинского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова» Российской академии наук

Ведущая организация:

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, г. Москва

Защита состоится 5 апреля 2018 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д409.001.01 на базе АО «НПП «Исток» им. Шокина» по адресу: 141190, Московская область, г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2а, большой конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «НПП «Исток» им. Шокина» и на сайте www.istokmw.ru

Автореферат разослан 21 февраля 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук



И.В. Куликова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Твердотельная сверхвысокочастотная (СВЧ) электронная компонентная база (ЭКБ), одним из важнейших элементов которой являются усилители мощности (УМ) на различных типах полевых транзисторов, активно востребована для разработки огромного числа радиоэлектронных систем. С каждым годом к данным системам предъявляются все более возрастающие требования по выходным характеристикам, что в свою очередь повышает требования к входящим в их состав активным элементам. Одним из перспективных методов улучшения характеристик СВЧ полевых транзисторов является разработка гетероструктур с донорно-акцепторным легированием. Полевые транзисторы на данных гетероструктурах (DA-DpHEMT) демонстрируют существенное (в 1,5 – 2 раза) увеличение коэффициента усиления и выходной СВЧ мощности по сравнению с традиционными псевдоморфными гетероструктурными полевыми транзисторами (DpHEMT), производимыми как в России, так и в мире. Данное техническое решение выполнено в рамках уже освоенной серийной технологии изготовления DpHEMT на AlGaAs-InGaAs-GaAs-гетероструктуре, что дополнительно усиливает актуальность исследований, направленных на изучение предельных характеристик нового типа транзисторов, которые в свою очередь обусловлены особенностями динамики горячих электронов в них. Определение частотных границ применимости и температурного режима работы данного вида транзистора является актуальной задачей, решение которой позволит эффективно применять новый тип транзисторов в УМ.

В зависимости от частотного диапазона, числа выпускаемых изделий и дополнительных требований, предъявляемых к УМ, а также от особенностей полевых транзисторов, на основе которых они будут изготовлены, существует много подходов к проектированию УМ. Например, при проектировании монолитных УМ или гибридных приборов выпускаемых большими сериями, наиболее оптимальным и общепринятым на настоящее время является использование нелинейных моделей полевых транзисторов, их X-параметров или сложных систем с наборами S-параметров, подробно измеренных в разных точках вольтамперной характеристики. Однако все эти методы основаны на точных зондовых измерениях специальных тестовых ячеек транзисторов, требуют высокой повторяемости используемых полевых транзисторов, очень дороги и трудоёмки. Например, создание нелинейной

модели может занимать от нескольких месяцев до полугода. Кроме того, в условиях недостаточно отработанной технологии транзисторов, когда на характеристиках тестовых ячеек могут сказываться фрактальные эффекты, применение этих методик может сталкиваться с принципиальными трудностями, что часто делает их малоприменимыми для мелкосерийного производства на постоянно меняющейся номенклатуре транзисторов. Особую актуальность эти проблемы приобрели с момента появления нового типа приборов – DA-DpHEMT. Вследствие чего остается актуальной задача разработки методик, позволяющих с одной стороны достаточно быстро определить параметры нелинейной модели дискретного полевого транзистора в условиях отсутствия специальных тестовых ячеек и с учетом имеющихся технических возможностей, но с другой стороны быть достаточно точными для создания УМ, характеристики которых соответствуют мировому уровню.

Цель работы: исследование динамики горячих электронов в гетероструктурных полевых транзисторах с донорно-акцепторным легированием и разработка методики оперативного определения параметров нелинейных моделей дискретных полевых транзисторов для разработки перспективных СВЧ усилителей мощности.

Постановка задачи. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– на основе гидродинамического моделирования проводился анализ особенностей динамики горячих электронов в DA-DpHEMT;

– проводился анализ малосигнальных характеристик DA-DpHEMT;

– проводилось сравнение особенностей динамики горячих электронов в полевых транзисторах на основе арсенида галлия (GaAs) и нитрида галлия (GaN);

– на основе гидродинамического моделирования проводился анализ распределения мощности тепловыделения в канале DA-DpHEMT;

– разрабатывался набор тестовых плат, позволяющий уменьшить погрешность контактирования при построении нелинейных моделей полевых транзисторов;

– разрабатывалась методика оперативного определения параметров нелинейной модели полевого транзистора, основанная на измерениях СВЧ характеристик дискретного прибора в специальной те-

стовой плате, позволяющей проводить измерения одного и того же транзистора как в 50-Омной линии, так и в различных согласующих схемах;

– разрабатывались схемы транзисторных усилителей X- и Ku-диапазонов на DpHEMT;

– исследовались основные причины, влияющие на точность проектирования гибридных усилителей мощности X- и Ku-диапазонов;

– разрабатывалась схема транзисторного усилителя X-диапазона на DA-DpHEMT.

Объектом исследования служат гетероструктурные полевые транзисторы, в том числе и с донорно-акцепторным легированием, мощные внутрисогласованные транзисторы (ВСТ) и усилители на их основе.

Предметом исследования являются физические процессы в гетероструктурных полевых транзисторах и методики оперативного определения параметров их нелинейных моделей.

Научная новизна. В диссертации впервые получены следующие результаты:

1. На основе теоретико-экспериментальной работы показано, что уменьшение поперечного пространственного переноса и усиление размерного квантования в DA-DpHEMT приводят к увеличению в 1,4 – 1,6 раза их средней дрейфовой скорости под затвором и максимальной рабочей частоты транзистора по сравнению с DpHEMT.

2. Продемонстрировано, что из-за большой энергии оптического фонона при прочих равных условиях всплеск дрейфовой скорости в традиционных полевых транзисторах на основе GaN заметно ниже, чем в приборах на GaAs, а, следовательно, ниже максимальная рабочая частота GaN транзисторов и их быстродействие.

3. Показано, что в условиях резкого уменьшения поперечного пространственного переноса происходит перемещение домена сильного поля в канале DA-DpHEMT от затвора к стоку и обратно за период СВЧ колебания, что расширяет область тепловыделения и снижает до 20% максимальный перегрев транзистора относительно температуры корпуса.

4. Экспериментально показано, что при увеличении общей ширины затвора транзистора до 5 мм сохраняется преимущество DA-

DrHEMT перед DrHEMT по удельной выходной мощности более чем в 1,5 раза.

5. Разработана схема согласования для DA-DrHEMT и проведены экспериментальные исследования, показавшие, что использование донорно-акцепторного легирования в арсенидгаллиевых гетероструктурных полевых транзисторах позволяет создавать в X-диапазоне частот усилители с выходной мощностью более 5 Вт в рабочей полосе частот более 25%, что соответствует удельной выходной мощности более 1 Вт на миллиметр ширины затвора.

6. Предложен метод измерений СВЧ характеристик дискретных полевых транзисторов в согласующих микрополосковых схемах с регулируемым импедансом, на основе которого разработана методика оперативного определения параметров их нелинейных моделей. Предложенный метод измерений позволяет повысить точность построения нелинейных моделей транзисторов в X-диапазоне частот, как за счет уменьшения погрешности контактирования, так и за счет измерений транзистора в условиях согласования с измерительным трактом. Данная методика позволяет проводить верификацию модели по коэффициенту усиления и мощности в различных цепях согласования для одного и того же экземпляра транзистора.

7. Исследованы основные факторы, вносящие погрешность в результаты численного анализа мощных усилительных каскадов на основе согласующих схем, выполненных на керамике с высокой диэлектрической проницаемостью (бериллий-самарий-стронций – БСТ), и предложены способы их учета при проектировании УМ.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Локализации горячих электронов в узкозонном материале канала DA-DrHEMT приводит к увеличению в 1,4 – 1,6 раза их средней дрейфовой скорости под затвором и максимальной рабочей частоты транзистора по сравнению с DrHEMT.

2. Перемещение домена сильного поля в канале DA-DrHEMT от затвора к стоку и обратно за период СВЧ колебания расширяет область тепловыделения и снижает до 20 % максимальный перегрев транзистора относительно температуры корпуса.

3. При увеличении общей ширины затвора транзистора сохраняется преимущество DA-DrHEMT перед DrHEMT по удельной выходной мощности более чем в 1,5 раза. Это позволяет создавать в X-диапазоне частот усилители с выходной мощностью более 5 Вт

в рабочей полосе частот более 25%, что соответствует удельной выходной мощности более 1 Вт на миллиметр ширины затвора.

4. Метод измерений S-параметров и максимальной выходной мощности дискретного транзистора, использующий согласующие микрополосковые схемы с регулируемым импедансом, позволяет повысить точность построения нелинейных моделей мощных полевых транзисторов.

Практическая ценность работы.

1. Полученные результаты позволяют проектировать полевые транзисторы с повышенной выходной мощностью и коэффициентом усиления в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн, а также создавать на их основе перспективные СВЧ усилители мощности.

2. Разработана схема согласования для DA-DpHEMT, характеристики которой находятся на уровне лучших мировых достижений в области разработки усилителей мощности на основе GaAs полевых транзисторов.

3. Разработанная методика построения нелинейных моделей позволяет за короткое время и с минимальными затратами разрабатывать выпускаемые мелкими сериями ВСТ и УМ в коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн на основе полевых транзисторов с параметрами, существенно изменяющимися от партии к партии.

4. На основе разработанной методики построения нелинейных моделей и с учетом особенностей гибридных схем, в состав которых входит керамика БСТ, проведено проектирование ряда ВСТ и гибридно-интегральных транзисторных УМ с характеристиками, соответствующими мировым аналогам, в том числе и для модулей АФАР.

Апробация результатов работы.

Результаты работы опубликованы в материалах следующих международных и российских конференций: Международной Крымской конференции «СВЧ- техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, СевГУ, 14-18 сентября 2009 г., 13-17 сентября 2010 г., 12-16 сентября 2011 г., 10-14 сентября 2012 г., 8-13 сентября 2013 г., 7-13 сентября 2014 г., 6-12 сентября 2015 г., 10-16 сентября 2017 г.; 10 Международной научно-практической конференции «Нанотехнологии – производству 2014», г. Фрязино Московской обл., 2-4 апреля 2014 г.; Всероссийской конференции «Электроника и мик-

роэлектроника 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 координационного научно-технического семинара по СВЧ технике, пос. Хахалы Нижегородской обл., 5-7 сентября 2017 г.

Публикации. По материалам диссертации автором опубликовано 35 печатных работ, из них 3 статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных, 12 статей в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК (2 из них без соавторов).

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения, списка литературы. Работа выполнена на 172 страницах текста, содержит 73 рисунка, 9 таблиц и список литературы из 138 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности 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 особенностей динамики горячих электронов в полевых транзисторах на основе арсенидгаллиевых (DA-DpHEMT и DpHEMT) и нитридгаллиевых гетероструктур. Отражены преимущества DA-DpHEMT перед DpHEMT как в отношении характеристик на большом и малом сигнале, так и в отношении температурного режима работы. Рассмотрены вопросы быстродействия полевых транзисторов на основе GaAs и GaN.

В разделе 1.1. рассмотрены перспективы применения гетероструктур с донорно-акцепторным легированием для разработки полевых транзисторов с повышенным уровнем мощности и коэффициента усиления. Приведены результаты первых экспериментов по изготовлению DA-DpHEMT и показано, что, несмотря на технологические трудности в создании омического контакта к гетероструктуре данного типа, выходная мощность полевых транзисторов возросла более чем в 1,5 раза по сравнению с DpHEMT. Приведены оценки влияния различных физических механизмов на повышение выходной мощности pHEMT. Показано, что введение дополнительных потенциальных ба-

рьеров резко уменьшает роль поперечного пространственного переноса электронов и влияние паразитных каналов проводимости в широкозонном материале на характеристики гетероструктурных полевых транзисторов, а за счет размерно-квантовых эффектов заметно падает интенсивность рассеяния горячих электронов. Отмечено, что при совершенствовании технологии изготовления данного типа транзисторов и дальнейшей оптимизации гетероструктуры возможно получение удельной выходной мощности порядка 2,5 Вт/мм, коэффициента усиления более 13 дБ, КПД при настройке на максимальную мощность 55 – 60%, а при введении полевого электрода возможно повышение значения удельной выходной мощности до 5 Вт/мм. Данные значения удельной выходной мощности сопоставимы с характеристиками современных GaN транзисторов.

В разделе 1.2. приведены результаты исследования динамики горячих электронов в GaN и GaAs полевых транзисторах, на основе которых проведено сравнение их быстродействия. Отличительными особенностями GaN являются высокая дрейфовая скорость электронов в сильных полях и не слишком высокая подвижность в объемном материале. Со времен разработки первых транзисторов с субмикронным затвором было известно, что работа таких приборов определяется не статической зависимостью дрейфовой скорости от напряженности электрического поля, а всплеском дрейфовой скорости электронов под затвором транзистора. При всплеске дрейфовой скорости ее величина может существенно превышать максимальное статическое значение в объемном материале, что существенно увеличивает быстродействие транзистора.

Для полевых транзисторов на основе GaN и GaAs приведены результаты расчетов дрейфовой скорости электронов под затвором (в частности, рассматривался крайний случай: подвижность в GaAs занижена до значений обычных для GaN гетероструктур и взята равной $\mu = 1700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$). Для описания динамики электронов в канале транзистора использовалась квазидвумерная гидродинамическая модель. Показано, что из-за всплеска дрейфовой скорости ее величина под затвором прибора на основе GaAs почти вдвое превосходит величину дрейфовой скорости в транзисторе на основе GaN, даже при одинаковой величине подвижности электронов и, несмотря на гораздо более высокие значения статической скорости электронов в GaN в сильных полях. Показано, что это связано со значительным отличием

времен релаксации по энергии в приборах на рассматриваемых материалах, которое 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. Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что быстродействие GaN транзисторов при прочих равных условиях будет не выше быстродействия полевых транзисторов на основе GaAs.

Также показано, что в приборе на основе GaN всплеск скорости происходит практически одинаково, как при микронной, так и при субмикронной длине затвора.

В разделе 1.3. рассмотрены перспективы применения DA-DpHEMT в миллиметровом диапазоне длин волн и проведена оценка величины дрейфовой скорости электронов в транзисторах данного типа. 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. $f_t \approx v_D/L_g$. Здесь L_g – эффективная длина затвора с учётом краевых эффектов (длина затвора с учетом обеднённых областей у краев затвора), v_D – средняя дрейфовая скорость электронов под затвором. Непосредственно измерить по отдельности эффективную длину затвора и среднюю дрейфовую скорость электронов, особенно для реальных приборов с развитой периферией и существенным влиянием паразитных элементов на выходные характеристики, крайне проблематично. В большинстве случаев эта частота определяется по результатам измерений S-параметров с последующим расчётом коэффициента усиления. На основе измеренных малосигнальных характеристик DA-DpHEMT и DpHEMT проведен расчет максимально возможного коэффициента усиления при двухстороннем согласовании. В DA-DpHEMT использовались гетероструктуры с подвижностью $\mu \approx 5400$ $см^2/(В·с)$ и с поверхностной плотностью электронов $n_s \approx 4 \cdot 10^{12}$ $см^{-2}$, вычисленными по результатам измерения эффекта Холла. В традиционных DpHEMT, использованных для сравнения, применялись гетероструктуры с холловскими подвижностью $\mu \approx 6000$ $см^2/(В·с)$ и поверхностной плотностью электронов $n_s \approx 3 \cdot 10^{12}$ $см^{-2}$. Оба типа транзисторов имели идентичную топологию и были изготовлены по одинаковой технологии. Показано, что DA-DpHEMT, при прочих равных условиях, несмотря на меньшие значения слабополе-

вой подвижности и большие значения сопротивления омических контактов, имеют коэффициент усиления на 3-4 дБ выше, чем традиционные DpHEMT. Этот эффект обусловлен тем, что в DA-DpHEMT средняя дрейфовая скорость под затвором в 1,4 – 1,6 раза выше. Расчет по гидродинамической модели и решение самосогласованных уравнений Шредингера и Пуассона показали, что рост дрейфовой скорости вызван уменьшением рассеяния горячих электронов по двум основным причинам: из-за усиления локализации горячих электронов в канале и сильного размерного квантования в потенциальной яме DA-DpHEMT-структуры, влияния которых сравнимы. Установленное увеличение средней дрейфовой скорости электронов в свою очередь ведет к увеличению максимальной рабочей частоты прибора вплоть до миллиметрового диапазона длин волн.

В разделе 1.4. рассмотрены проблемы, связанные с температурными режимами работы мощных полевых транзисторов на основе GaAs. Проведен анализ физических механизмов, определяющих жесткую локализацию домена сильного поля и области интенсивного тепловыделения у стокового края затвора гетероструктурных полевых транзисторов. Показано, что данный эффект, принципиально отличающий традиционные гетероструктурные полевые транзисторы от гомоструктурных, связан с поперечным пространственным переносом электронов между слоями гетероструктуры. Показано, что в полевых транзисторах на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием из-за существенного уменьшения роли поперечного пространственного переноса возможна перестройка статического домена, как и в обычных гомоструктурных транзисторах, что до 20% снижает максимальный перегрев прибора относительно температуры корпуса.

Во второй главе приведен обзор современных методик построения нелинейных моделей полевых транзисторов и методов проектирования СВЧ УМ на их основе, их достоинства и недостатки. Изложены трудности, возникающие при моделировании полевых транзисторов и проектировании УМ, связанные с конструкцией современного мощного полевого транзистора с большой шириной затвора и особенностями процесса сборки. Приведены результаты создания нелинейных моделей полевых транзисторов и проектирования на их основе мощных ВСТ и гибридных УМ X-диапазона для передающих каналов АФАР.

В разделе 2.1. представлена методика оперативного определения параметров нелинейных моделей полевых транзисторов. Проведен анализ проблем, возникающих в процессе измерений характеристик мощных полевых транзисторов. Предложен метод измерений СВЧ характеристик дискретных полевых транзисторов в специальных согласующих микрополосковых схемах с регулируемым импедансом. Этот метод позволяет не только достаточно просто и точно вычленять погрешности контактирования, но и существенно повысить точность нелинейных моделей полевых транзисторов в X-диапазоне по сравнению с методом измерения СВЧ характеристик транзистора в 50-Омных линиях, как за счет уменьшения погрешности контактирования, так и за счет измерений транзистора в условиях согласования с измерительным трактом. Погрешность определения частоты согласования транзистора по входу и выходу снижается с 10% до малых величин (Рис. 1), погрешность определения фаз S-параметров – с 30% до 10% (Рис. 2).

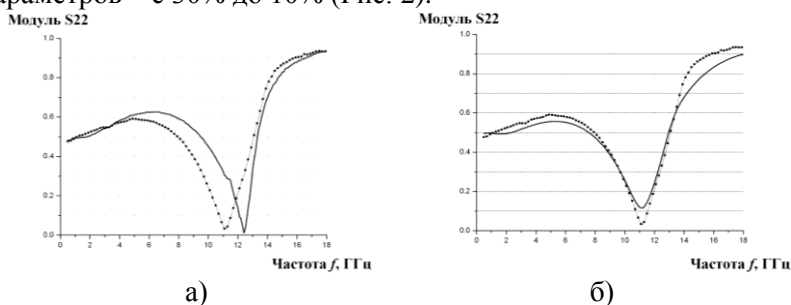


Рис. 1. Сравнение расчетной и измеренной зависимости модуля S22 схемы, согласованной на максимум S21, от частоты: а) до учета погрешности контактирования, б) погрешность контактирования учтена

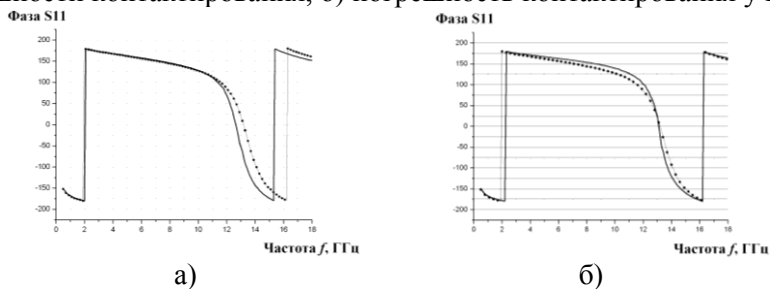


Рис. 2. Сравнение расчетной и измеренной зависимости фазы S11 схемы, согласованной на максимум S21, от частоты: а) до учета погрешности контактирования, б) погрешность контактирования учтена

Особенностью данного подхода является то, что один и тот же транзистор с неизменными особенностями монтажа может измеряться не только в 50-Омных линиях, но и в различных согласующих схемах.

Так для построения нелинейной модели и нахождения поправок, уменьшающих погрешность контактирования, используются результаты измерений транзистора в двух вариантах конфигурации тестовой схемы: в 50-Омной линии (Рис. 3, а) и в согласующей схеме, настроенной на максимум коэффициента усиления (Рис. 3, б). А верификация модели проводится по коэффициенту усиления и мощности в согласующей схеме, настроенной на максимум мощности.

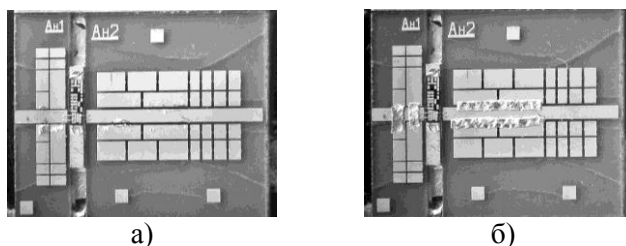


Рис. 3. Предложенная тестовая плата: а) до подключения элементов согласования, б) с подключенными элементами согласования

Кроме того, имеется возможность менять согласующую схему и дополнительно проверять соответствие расчета и эксперимента. При этом, в отличие от стандартного метода слепков, размеры и форма согласующих цепей хорошо известны, и их импеданс может быть достаточно точно рассчитан, а неоднородности, вносимые в данном случае при замыкании индием, достаточно малы и могут быть без большой погрешности внесены в электродинамический расчет.

В разделе 2.2. и 2.3. подробно рассмотрены проблемы, связанные с влиянием качества и особенностей монтажа на характеристики гибридных усилителей мощности.

В разделе 2.2. представлено исследование влияния промахов в задании длин проволок монтажа транзисторов на характеристики гибридных УМ. Рабочая частота усилителя и его выходная мощность сильно зависят даже от небольших изменений импеданса на входе и выходе транзистора, а изменение длины проволоки может вносить существенный вклад в согласующий импеданс. Несмотря на то, что в гибридных УМ монтаж проволок происходит на специальных полуав-

томатических аппаратах, из-за больших размеров плат (часто около 10 мм) и транзисторных чипов (около 2 мм) платы с согласующими элементами не всегда плотно прилегают к пьедесталу, на котором находится транзистор, что вынуждает оператора увеличивать длину проволоки. Также возможна неровная посадка плат, что приводит к различиям в длине проволок по длине пьедестала (даже на одном транзисторе).

Представлены результаты измерений проволок разварки на затворе и стоке транзисторов для трехваттных (12 шт.) и десятиваттных (2 шт.) УМ, работающих в X-диапазоне частот, в корпусе и на основании. Характерный разброс длины проволок составил более 150 мкм (при длинах проволок от 350 до 500 мкм). Показано, что изменение длин проволок в данном диапазоне приводит к смещению центральной частоты более чем на 1 ГГц и изменению амплитуды выходной мощности до 2 раз. Стандартизация длин проволок позволила нормализовать процесс монтажа и подтвердить результаты проектирования УМ.

В разделе 2.3. проанализированы проблемы, связанные с описанием трехмерных неоднородностей гибридных транзисторных усилителей. Описаны особенности конструкции гибридных УМ X-диапазона для передающих каналов АФАР.

На Рис. 4 представлена фотография двухкаскадного гибридного УМ. В цепях согласования затворов и стоков транзисторов используются элементы, выполненные на керамике БСТ ($\epsilon = 80$).

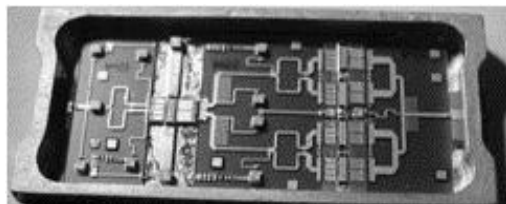


Рис. 4. Фотография мощного двухкаскадного УМ

Выявлено, что трехмерные неоднородности схемы усилителя (близкое расположение краев плат, зазоры между платами) оказывают существенное влияние на выходные характеристики усилителя. Программы двумерного моделирования не могут учесть эти неоднородности. Поэтому было проведено теоретическое исследование по определению эквивалентных схем таких неоднородностей. Проведено трехмерное и двумерное моделирование элементов согласующих

схем усилителя. Сопоставление результатов трехмерного и двухмерного моделирования позволило определить значения элементов эквивалентных схем трехмерных неоднородностей схемы усилителя. Проведено моделирование схемы усилителя с учетом трехмерных неоднородностей для различных вариантов заполнения зазоров между платами (воздух, припой). Показано, что различные особенности сборки усилителя могут приводить к уменьшению его выходной мощности и сдвигу рабочей полосы частот. Сопоставление с экспериментом подтвердило результативность такого подхода к моделированию мощных гибридных усилителей.

В разделе 2.4. приведены результаты разработки ряда усилителей мощности для передающих каналов АФАР на основе предложенной методики построения нелинейной модели и с учетом особенностей гибридных схем, в состав которых входит керамика БСТ.

Разработан двухкаскадный УМ трехсантиметрового диапазона длин волн, обеспечивающий выходную мощность более 13 Вт и коэффициент усиления 14 – 15 дБ при КПД 25%.

Разработан двухкаскадный УМ X-диапазона с выходной мощностью 14 – 15 Вт, КПД не менее 30% и коэффициентом усиления не менее 8дБ.

Разработан двухкаскадный усилитель X-диапазона, обеспечивающий выходную мощность не менее 17 Вт в 10% полосе частот и КПД не менее 25%.

Разработаны малогабаритные усилители мощности Ku-диапазона с выходной мощностью 6 Вт, коэффициентом усиления не менее 33 дБ и КПД не менее 25%.

Проведен анализ проблем, связанных с устойчивостью, описаны расчетные и экспериментальные характеристики, особенности конструкции усилителей.

В разделе 2.5. представлены первые результаты разработки мощного усилительного каскада, изготовленного на основе DA-DpHEMT. Апробация данного типа гетероструктур проводилась на конструкции мощного полевого транзистора с общей шириной затвора 0,4, 0,8 и 1,2 мм. На частоте 10 ГГц удельная выходная мощность DA-DpHEMT с перечисленными ширинами затвора составила более 1,5 Вт/мм, что более чем в 1,5 раза выше удельной выходной мощности DpHEMT. Все измерения мощности проводились с помощью измерительной установки, в которой согласующие трансформаторы

обеспечивали хорошее согласование в одной задаваемой точке частотного диапазона (10 ГГц). Для изучения возможностей данного типа транзисторов в реальной схеме усилителя были изготовлены DA-DpHEMT с шириной Г-образного затвора 4,8 мм. Несколько экземпляров транзисторов были смонтированы в идентичные тестовые схемы, фотография которой приведена на Рис. 5. Результаты измерений тестовых схем на основе DA-DpHEMT сравнивались с аналогичными данными по схемам с той же топологией на основе DpHEMT (Рис. 6). Следует отметить, что оба типа сравниваемых транзисторов были изготовлены по одной и той же технологии с использованием метода оптической литографии, имели одинаковую топологию и длину затвора.

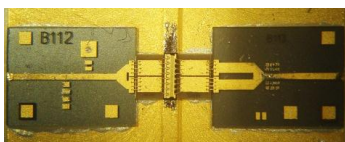


Рис. 5. Фотография тестовой схемы АО «НПП «Исток» им. Шокина»

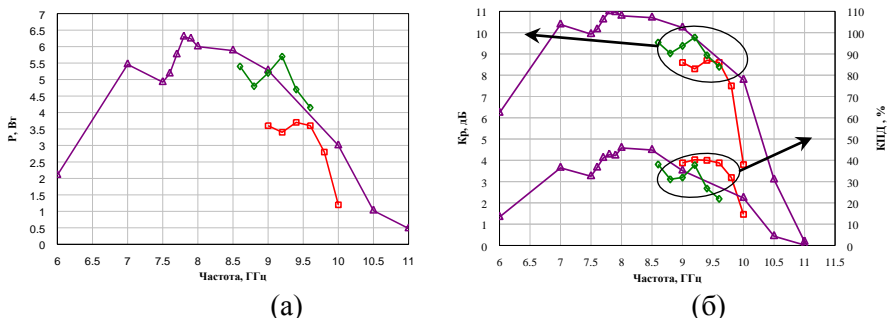


Рис. 6. Выходные характеристики тестовых схем:

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 $U_d=8В$

Показано, что выходная СВЧ мощность и коэффициент усиления тестовой схемы с DA-DpHEMT более чем в 1,5 раза превосходит аналогичные параметры в тестовой схеме с DpHEMT, а КПД данных схем практически одинаков. 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%. Если соотнести полученные результаты с удельной мощностью транзистора, то получим, что в полосе частот 7,5-8,5 ГГц DA-DpHEMT 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, тогда как DpHEMT имеет всего лишь 0,7 Вт/мм в полосе частот 9-9,5 ГГц. Полученный результат демонстрирует, что при увеличении ширины затвора транзистора сохраняется преимущество DA-DpHEMT перед DpHEMT по удельной выходной мощности более чем в 1,5 раза. Представленные характеристики усилительного каскада на DA-DpHEMT находятся на уровне лучших мировых достижений в области разработки усилителей мощности на основе GaAs полевых транзисторов.

В заключении сформулированы основные полученные результаты:

1. Показано, что уменьшение поперечного пространственного переноса и усиление размерного квантования приводят к увеличению в 1,4 – 1,6 раза средней дрейфовой скорости горячих электронов под затвором и максимальной рабочей частоты транзистора DA-DpHEMT по сравнению с DpHEMT.

2. Продемонстрировано, что из-за малых времен релаксации по энергии при прочих равных условиях всплеск дрейфовой скорости в традиционных полевых транзисторах на основе GaN заметно ниже, чем в приборах на GaAs, и поэтому их быстродействие и максимальная рабочая частота будет не выше аналогичных параметров полевых транзисторов на основе GaAs.

3. Обнаружено, что в условиях резкого уменьшения поперечного пространственного переноса в гетероструктурных полевых транзисторах за период СВЧ колебания может происходить перестройка статического домена из-под затвора к стоку и обратно, что снижает до 20 % максимальный перегрев таких приборов относительно температуры корпуса.

4. Предложен метод измерений СВЧ характеристик дискретных полевых транзисторов в согласующих микрополосковых схемах с регулируемым импедансом, на основе которого разработана методика оперативного определения параметров их нелинейных моделей. Предложенный метод измерений позволяет повысить точность построения

нелинейных моделей транзисторов в X-диапазоне частот, как за счет уменьшения погрешности контактирования, так и за счет измерений транзистора в условиях согласования с измерительным трактом. Данная методика позволяет проводить верификацию модели по коэффициенту усиления и мощности в различных цепях согласования для одного и того же экземпляра транзистора без использования дорогостоящего оборудования. Продемонстрирована результативность данной методики на примере создания ряда УМ для передающих каналов АФАР.

5. Исследованы основные причины, влияющие на точность проектирования гибридных УМ в X- и Ku- диапазонах, использующих связанные микрополосковые линии на керамике с высокой диэлектрической проницаемостью в качестве согласующих элементов.

6. Продемонстрировано, что при увеличении общей ширины затвора транзистора сохраняется преимущество DA-DpHEMT перед DpHEMT по удельной выходной мощности более чем в 1,5 раза, что позволяет создавать усилительные каскады на DA-DpHEMT в X-диапазоне частот с выходной мощностью более 5 Вт в рабочей полосе частот более 25%, что соответствует удельной выходной мощности более 1 Вт на миллиметр ширины затвора. Этот результат находится на уровне лучших мировых достижений в области разработки усилителей мощности на основе GaAs полевых транзисторов.

Публикации по теме диссертации в журналах, индексируемых в международных базах данных

1. А.А. Борисов, К.С. Журавлев, С.С. Зырин, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.А. Маковецкая, В.И. Новоселец, А.Б. Пашковский, А.И. Торопов, Н.Д. Урсуляк, С.В. Щербаков Исследование средней дрейфовой скорости электронов в pHEMT транзисторах // Письма в Журнал Технической Физики, том 42, вып. 16, 2016, с. 41 - 47.
2. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, В.Г. Лапин, С.В. Щербаков, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, А.А. Капралова (Маковецкая) Управление положением оптимальной рабочей точки мощного гетероструктурного полевого транзистора путем формирования подзатворного потенциального барьера на основе донорно-акцепторной структуры // Письма в Журнал Технической Физики, том 41, вып. 3, 2015, с. 81 - 87.

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

Публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК

1. А.А. Маковецкая, Д.В. Калита, В.А. Пчелин, В.Г.Лапин, А.Б. Пашковский, В.М. Лукашин, С.В. Щербаков, С.И. Новиков, 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, вып.1(536), 2018, с. 25-31.
2. 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, в. 1(536), 2018, с. 6-20.
3. В.А. Пчелин, А.А. Лисицын, В.Б. Трегубов, И.П. Корчагин, Л.В. Манченко, А.А. Маковецкая, С.С. Семенюк Малогабаритные усилители с выходной мощностью не менее 0,5 и 6 Вт для АФАР Ku-диапазона // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, вып.1(534), 2017, с. 22-27.
4. А.А. Маковецкая Особенности рассеяния тепла в полевых транзисторах на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, вып.1 (532), 2017, с. 59- 65.
5. А.А. Маковецкая, Л.В. Манченко, А.Б. Пашковский, Т.И. Потапова, И.П. Чепурных, В.А. Пчелин, В.И. Новоселец, С.В. Левашов, И.П. Корчагин, В.Б. Трегубов, Р.А. Силин, В.Н. Уласюк, К.Г. Симонов Краевые эффекты в согласующих элементах из керамики с большой диэлектрической проницаемостью для мощных гибридных транзисторных усилителей // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, вып.1 (528), 2016, с. 75- 85.
6. 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, вып. 1(528), 2016, с. 65- 69.
7. А.Б. Пашковский., В.М. Лукашин, Я.Б. Мартынов, В.Г. Лапин, А.А. Капралова (Маковецкая), И.А. Анисимов Нелокальный дрейф электронов в полевых транзисторах на основе нитрида галлия // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, вып. 4(523), 2014, с. 5- 16.
 8. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, В.Г. Лапин, С.В. Щербаков, А.А. Капралова (Маковецкая), 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, вып. 3(522), 2014, с. 5- 14.
 9. А.А. Капралова (Маковецкая), И.П. Кочагин, Л.В. Манченко, Э.В. Погорелова, В.А. Пчелин, В.Б. Трегубов Тестовая плата для построения и коррекции нелинейных моделей мощных полевых транзисторов // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, вып. 1(520), 2014, с. 39- 44.
 10. А.А. Капралова (Маковецкая) Влияние промахов в задании длин проволочек разварки транзисторов на характеристики гибридных СВЧ усилителей мощности // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, вып. 3(514), 2012, с. 13-22.
 11. А.А. Капралова (Маковецкая), В.Б. Трегубов Мощный внутри-согласованный транзистор X-диапазона для передающего канала АФАР // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, вып. 3(510), 2011, с. 14-22.
 12. А.А. Капралова (Маковецкая), В.М. Лукашин, Л.В. Манченко, А.Б. Пашковский, В.А. Пчелин Уменьшение погрешности контактирования при измерении параметров мощных полевых транзисторов // Радиотехника, № 4, 2011, с. 67-71.

Другие публикации по теме диссертации

1. А.А. Капралова (Маковецкая), Л.В. Манченко, В.А. Пчелин Уменьшение погрешности контактирования при восстановлении эквивалентных схем мощных полевых транзисторов // Материалы 19 Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь: Вебер, 2009, с. 121-122.

2. А.А. Капралова, В.А. Пчелин, В.Б. Трегубов Внутрисогласованный транзистор X-диапазона с выходной мощностью 14 Вт // Материалы 20 Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь: Вебер, 2010, с. 129-130.
3. В.А. Пчелин, И.П. Корчагин, В.М. Мальшик, А.В. Галдецкий, Л.В. Манченко, А.А. Капралова (Маковецкая) Двухкаскадный усилитель X-диапазона с выходной мощностью 17 Вт на элементарной базе ФГУП «НПП «Исток» // Материалы 21 Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь: Вебер, 2011, с. 135-136.
4. А.А. Капралова (Маковецкая), Л.В. Манченко, А.Б. Пашковский, Т.И. Потапова, В.А. Пчелин, И.П. Чепурных Влияние особенностей сборки на характеристики мощных транзисторных усилителей // Материалы 21 Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь: Вебер, 2011, с. 139-140.
5. А.А. Капралова (Маковецкая), И.П. Корчагин, Л.В. Манченко, А.Б. Пашковский, В.А. Пчелин, В.Б. Трегубов Коррекция нелинейных моделей мощных полевых транзисторов по их измерениям в тестовой плате // Материалы 21 Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь: Вебер, 2011, с. 261-262.
6. А.А. Капралова (Маковецкая), А.Б. Пашковский Поперечный пространственный перенос электронов и особенности рассеяния тепла в гетероструктурных полевых транзисторах // Сборник трудов всероссийской конференции "Микроэлектроника СВЧ", Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, том 1, 2012, с. 54-58.
7. А.А. Капралова (Маковецкая), Л.В. Манченко, И.П. Чепурных Уточнение двумерных моделей пассивных элементов ГИС СВЧ по результатам их трехмерного моделирования // Сборник трудов всероссийской конференции "Микроэлектроника СВЧ", Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, том 2, 2012, с. 301-303.
8. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, А.А. Капралова (Маковецкая) Поперечный пространственный перенос электронов и особенности локализации домена сильного поля в гетероструктурных полевых транзисторах // Материалы 22 Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь: Вебер, 2012, с. 153-154.

9. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, Е.И. Голант, А.А. Капралова (Маковецкая) Особенности электронного транспорта в полевых транзисторах на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием // Материалы 23 Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь: Вебер, 2013, с. 122-124.
10. 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», г. Фрязино Московской обл., 2014, с. 52-53.
11. 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», г. Фрязино Московской обл., 2014, с. 54-55.
12. 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”, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 2014, с. 111-113.
13. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, А.А. Капралова (Маковецкая), И.А. Анисимов Особенности нелокального разогрева электронов в полевых транзисторах на основе нитрида галлия // Сборник трудов всероссийской конференции “Электроника и микроэлектроника СВЧ”, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 2014, с. 207-211.
14. 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 // Материалы 24 Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь: Вебер, 2014, с. 79-80.

15. 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”, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 2015, с. 19-23.
16. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, А.А. Капралова (Маковецкая), 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 // Сборник трудов всероссийской конференции “Электроника и микроэлектроника СВЧ”, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 2015, с. 99-101.
17. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, А.А. Капралова (Маковецкая) Малосигнальные СВЧ характеристики DA-HEMT // Материалы 25 Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь: Вебер, 2015, с. 95-96.
18. 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 внутрисогласованный транзистор X-диапазона на основе транзистора на гетероструктуре с донорно-акцепторным легированием // Сборник трудов всероссийской конференции “Электроника и микроэлектроника СВЧ”, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 2017, с. 192 – 195.
19. 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, Нижний Новгород, 2017, с. 71-73.
20. А.А. Маковецкая, В.А. Пчелин, В.Г. Лапин, А.Б. Пашковский, В.М. Лукашин, С.В. Щербаков, К.С. Журавлев, А.И. Торопов GaAs ВСТ X-диапазона с удельной выходной мощностью более 1 Вт/мм // Материалы 27 Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" Севастополь: Вебер, 2017, с. 71-77.

Подписано в печать 15 февраля 2018 г.
Формат 60x80/16. Объём 1 усл.- печ. лист.
Тираж 50 экз. ризограф ОАО «Исток Аудио Интернэйшнл»