

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д409.001.01 НА БАЗЕ
Акционерного общества «Научно- производственное предприятие «Исток»
имени А.И. Шокина» ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК.

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 05.04.2018 протокол № 37

О присуждении Маковецкой Алёне Александровне, гражданке РФ, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Исследование динамики горячих электронов в полевых транзисторах на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием для разработки перспективных СВЧ усилителей мощности» по специальности 05.27.01 - «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» принята к защите 01 февраля 2018 года, протокол № 36, диссертационным советом Д409.001.01 на базе Акционерного общества «Научно- производственное предприятие «Исток» имени А.И. Шокина», 141190, Московская область, г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2а, открытый приказом № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Маковецкая Алёна Александровна, 1985 года рождения.

В 2008 г. соискатель окончила Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (МГТУ МИРЭА) по специальности «Микроэлектроника и твердотельная электроника».

С 12.11.2012 по 12.11.2017 проходила обучение в аспирантуре АО «НПП «Исток» им. Шокина» по специальности 05.27.01 - «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах», отрасль наук 05.00.00 – Технические науки (заочная форма обучения).

Работает ведущим инженером в отделении 10 Акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Исток» имени А.И. Шокина».

Диссертация выполнена в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Пашковский Андрей Борисович, начальник отдела 10.2 отделения 10 АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Официальные оппоненты:

1. Ильичёв Эдуард Анатольевич, гражданин РФ, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Квантовая физика и наноэлектроника», Федеральное государственное автономное образовательное учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»;

2. Сизов Владимир Евгеньевич, гражданин РФ, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Фрязинского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова» Российской академии наук;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном Мальцевым Петром Павловичем, доктором технических наук, профессором, председателем ученого совета и Хабибулиным Рустамом Анваровичем, кандидатом физико-математических наук, ученым секретарем, составленном Гнатюком Дмитрием Леонидовичем, кандидатом технических наук, заведующим лабораторией исследований и разработок методов моделирования и проектирования наногетероструктурных СВЧ-транзисторов и МИС, и исследования их характеристик в см- и мм-диапазонах, и утвержденном Гамкрелидзе Сергеем Анатольевичем, доктором технических наук, профессором, директором, указала, что перечисленные в отзыве замечания не снижают теоретической и практической ценности проведенных исследований и полученных результатов, а автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01.

Соискатель имеет 41 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации 35 научных работ (общим объемом 11,5 печатных листов), из которых 15 (общим объемом 7,6 печатных листов) опубликованы в научных изданиях, включенных в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, а также 6 печатных листов принадлежит соискателю лично, в том числе 2 статьи без соавторов.

**Наиболее значимые научные работы 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 рНЕМТ 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 ге-тероструктурного 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.

в журналах из перечня ВАК

1. 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.

2. А.А. Капралова (Маковецкая) Влияние промахов в задании длин проволок разварки транзисторов на характеристики гибридных СВЧ усилителей мощности // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, вып. 3(514), 2012, с. 13-22.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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 ДАРНЕМТ // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, вып. 1(528), 2016, с. 65-69.

8. 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 гал-лия // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, вып. 4(523), 2014, с. 5- 16.

9. 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 нуле-вом смещении на затворе // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, вып. 3(522), 2014, с. 5- 14.

10. 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.

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 кон-тактирования при измерении параметров мощных полевых тран-зисторов // Радиотехника, № 4, 2011, с. 67-71.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

В отзыве ведущей организации указано следующее.

Актуальность работы обусловлена тем, что в настоящее время мощные полевые транзисторы являются основным активным элементом твердотельных усилителей мощности, которые определяют выходные характеристики большого числа радиоэлектронных систем, а так же тем, что в данный момент возникла необходимость создания этих систем на отечественной элементной базе, имеющей высокие выходные параметры. Выявленные соискателем закономерности позволяют предположить, что новый тип полевого транзистора (DA-DpHEMT), имеющий удельную выходную мощность в 1,5 раза выше мировых аналогов и впервые апробированный в АО «НПП «Исток» им. Шокина», может работать в нижней части миллиметрового диапазона частот, а также позволяют выбирать режим работы для DA-DpHEMT таким образом, чтобы тепловая нагрузка на транзисторе была минимальна, что, безусловно, является важным и значимым результатом, как в научном, так и в практическом плане.

Таким образом, выбранная Маковецкой А.А. тема диссертации и выполненная по ней работа по определению конкретных возможностей нового типа транзисторов в усилителях мощности и перспектив их применения в миллиметровом диапазоне частот является актуальной.

Оценка основных научных результатов диссертационной работы Маковецкой А.А. показывает, что они могут быть использованы при разработке

нового типа арсенидгаллиевых полевых транзисторов на основе гетероструктур с донорно-акцепторным легированием для усилителей мощности миллиметрового диапазона длин волн. Полученные результаты создают необходимый научно-технический задел для разработки передающих и приемопередающих модулей, в том числе для АФАР.

Научная значимость результатов диссертационной работы состоит в следующем:

- Определены причины значительного роста дрейфовой скорости электронов под затвором DA-DpHEMT при введении в структуру локализирующих потенциальных барьеров. Это открывает перспективы для создания мощных полевых транзисторах на достаточно широкозонных материалах (с шириной запрещенной зоны более 1 эВ) с быстроедействием узкозонных (с шириной запрещенной зоны около 0,5 эВ), и позволит применять их в миллиметровом диапазоне частот.

- Обнаружена особенность DA-DpHEMT транзисторов, заключающаяся в расширении области тепловыделения за счет перемещения домена сильного поля от затвора к стоку при работе транзистора в режиме большого сигнала, позволяющая оптимизировать структуру и выбирать режим работы транзистора таким образом, чтобы уменьшить тепловую нагрузку на активном элементе.

В качестве недостатков указывается следующее:

1. Из текста диссертации и автореферата не ясно, что гетероструктура с донорно-акцепторным легированием впервые предложена в России и не имеет зарубежных аналогов, таким образом, автор исследует новый класс транзисторов, что, несомненно, подчеркивает новизну и актуальность проведенных исследований. Также явно не разъяснено, что аббревиатура «DA-DpHEMT» предложена автором, и не является общепринятой в научном мире.

2. Из раздела 1.3. не ясно, каким образом большое количество квантовых уровней увеличивает дрейфовую скорость электронов, а также как влияет поперечный пространственный перенос на рассеяние электронов в квантовой яме канала.

3. В разделе 1.1.4 и 1.2 сделаны слишком смелые прогнозы о перспективности нового типа транзисторов в миллиметровом диапазоне длин волн, не подкрепленные достаточными экспериментальными данными, а также о возможном превосходстве нового типа прибора не только по сравнению с арсенидгаллиевыми, но и нитридгаллиевыми транзисторами.

4. В разделе 2.4. не приведено сравнение разработанных на основе предложенной методики усилителей мощности с зарубежными аналогами, однако сделано утверждение о получении в работе результатов «на уровне лучших мировых достижений».

5. С точки зрения мировых достижений в области СВЧ измерений предложенная автором методика измерений СВЧ характеристик дискретных полевых транзисторов является несвоевременной и обеспечивает меньшую точность, чем зондовые измерения с применением современных средств контактирования, имеющих высокую воспроизводимость контактного сопротивления, а также промышленно изготовленных калибровочных мер. Применение современных методов потенциально позволило бы снизить погрешность измерений и повысить точность построения нелинейных моделей полевых транзисторов, а, следовательно, улучшить характеристики разрабатываемых усилителей мощности.

6. В тексте диссертации и автореферата присутствуют опечатки и стилистические неточности. Например, на странице 10 автореферата указана отрицательная степень порядка поверхностной плотности электронов в структурах, а на странице 68 текста диссертации последнее предложение стилистически не согласованно.

7. У большинства таблиц в диссертационной работе отсутствуют заголовки, что затрудняет их восприятие.

Отмечено, что указанные недостатки **не снижает научную и практическую ценность** полученных автором результатов.

В отзывах официальных оппонентов Ильичёва Э.А. и Сизова В.Е. отмечается, что рассматриваемая диссертационная работа является целостным и законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научно-техническом уровне. В работе приведены научные результаты, позволяющие квалифицировать их, как научно обоснованные решения актуальной задачи совершенствования и применения СВЧ полевых транзисторов на псевдоморфных AlGaAs-InGaAs-GaAs-гетероструктурах. Проведенные Маковецкой А.А. исследования имеют существенное значение для развития науки о физике полупроводников и полупроводниковых приборов СВЧ диапазона.

Отмечается актуальность, новизна научного подхода, практическая значимость работы, соответствие работы требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук», сделан вывод о присуждении соискателю искомой учёной степени.

Ильичев Э.А. указывает следующие замечания:

1. Нет информации о технологии формирования барьерных акцепторно-донорных δ -слоёв, что затрудняет понимание динамики поведения в них электронов в процессе изменений напряжения на затворе.

2. Нет информации о токах утечки по затвору для транзисторов архитектуры DA-DpHEMT; что представляется важным для оптимизации архитектуры гетероструктуры (она представлена в таб.1 на стр. 30), так как

увеличению собственной крутизны ПТ за счет вариации толщины буферных слоев будет препятствовать вполне реальная возможность возникновения утечек по затвору по механизму Фаулера-Нордгейма.

3. Нет сравнительных данных о температурных диапазонах стабильной работы обсуждаемой ЭКБ на основе гетероструктурных полевых транзисторов, использующих традиционные и альтернативные конструкции на твердых растворах GaAlAs и GaInN.

Замечания и рекомендации Сизова В.Е.:

1. В диссертационной работе отмечается, что введение в гетероструктуру высоких потенциальных барьеров приводит к локализации горячих электронов в канале транзистора. Было бы полезно провести измерения гетероструктуры нового типа методом количественного анализа спектра подвижности (quantitative mobility spectrum analysis – QMSA), который дает возможность определить параметры различных групп электронов, имеющих разную подвижность и концентрацию. Это бы позволило напрямую подтвердить данное утверждение.

2. В работе не приведено описание псевдоморфной AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктуры без донорно-акцепторного легирования (состав и толщины слоев, степень легирования), а также не указана глубина квантовой ямы в ней, что не дает возможности для их детального сравнения.

3. В тексте диссертации явно не указано, что одним из преимуществ предложенной методики измерений дискретных полевых транзисторов является ее экономичность, т.к. для ее использования не требуется покупка современного дорогостоящего оборудования, которое обычно используется для построения и верификации модели.

4. В разделе 2.5. рассматриваются характеристики усилительных каскадов на основе транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием с делителями и сумматорами двух видов, однако не указано сколько таких каскадов было изготовлено.

На автореферат получено 7 отзывов. Все отзывы положительные.

1. АО «НПО «Радиоэлектроника» им. В.И. Шимко», г Казань. Отзыв подготовил начальник лаборатории ОГТ, д.т.н., профессор Крючатов В.И.

2. ООО «НПО «Синергетика», г. Москва. Отзыв подготовил генеральный директор, старший научный сотрудник, д.ф.-м.н. Обухов И.А.

3. АО «НИИП имени В.В. Тихомирова», г. Жуковский. Отзыв подготовил заместитель генерального директора по научной работе, главный конструктор, к.т.н. Синани А.И. и ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н. Винярский В.Ф.

4. ИФП им. Ржанова СО РАН, Новосибирск. Отзыв подготовил старший научный сотрудник лаборатории кинетических явлений в полупроводниках, к.ф.-м.н. Протасов Д.Ю.

5. АО «Светлана-Электронприбор», г. Санкт-Петербург. Отзыв подготовил директор по науке и НТР, к.ф.-м.н., Вьюгинов В.Н.

6. АО «Микроволновые системы», г. Москва. Отзыв подготовил главный конструктор, к.т.н. Кищинский А.А.

7. НИИ систем электрической связи ТУСУР, г. Томск. Отзыв подготовили д.т.н., г.н.с. Малютин Н.Д. и д.т.н., профессор, зав.каф. Физической электроники, проректор по УР ТУСУР П.Е. Троян.

Отмечается, что диссертация посвящена исследованию динамики горячих электронов в транзисторах типа DpHEMT с усовершенствованной гетероструктурой (DA-DpHEMT) и возможности создания на их основе перспективных усилителей мощности. Актуальность работы обусловлена, как минимум, тремя обстоятельствами:

- решаются важные задачи современной твердотельной электроники по повышению удельной выходной мощности и рабочей частоты СВЧ транзисторов;

- транзисторы типа DpHEMT имеют широкое практическое применение в системах спутникового и кабельного телевидения, беспроводной связи и в устройствах радиолокации;

- новый тип транзистора изготовлен в рамках освоенной технологии, что обеспечивает оперативное внедрение его в серийное производство.

В отзывах отмечается, что автором проведен большой объем теоретических и экспериментальных исследований, позволивший получить ряд важных новых научно-практических результатов, из которых можно выделить следующие:

1. Впервые показано, что уменьшение поперечного пространственного переноса электронов и усиление размерного квантования в DA-DpHEMT приводят к увеличению в 1,4 – 1,6 раза их средней дрейфовой скорости под затвором и, следовательно, максимальной рабочей частоты транзистора по сравнению с DpHEMT. Это означает, что при использовании в конструкции нового типа транзисторов затворов длиной менее 0,3 мкм возможно их применение в миллиметровом диапазоне длин волн.

2. Показано, что благодаря уменьшению поперечного пространственного переноса электронов из слоя InGaAs в AlGaAs слои становится возможным реализовать такой режим работы транзистора, при котором будет происходить перемещение домена сильного поля от затвора к стоку и обратно за период СВЧ колебания, что расширяет область тепловыделения и снижает на величину до 20% перегрев транзистора относительно температуры корпуса.

3. В работе продемонстрировано, что при увеличении общей ширины затвора транзистора сохраняется преимущество DA-DpHEMT и DpHEMT 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. Сочетание этих трех параметров усилительного каскада является результатом, находящимся на уровне лучших мировых достижений в области разработки усилителей мощности на основе GaAs полевых транзисторов.

4. Предложен экономичный и сравнительно простой метод достижения достаточной точности нелинейных моделей дискретных полевых транзисторов для проектирования гибридных УМ, основанный на разработанной автором тестовой схеме с регулируемым импедансом. Предложенный метод позволил разработать ряд серийных усилителей мощности X- и Ku-диапазонов, применяемых в современных радиоэлектронных системах, таких как активные фазированные антенные решетки.

Большинство теоретических идей диссертации являются научными фактами, подтвержденными практическими результатами.

Полученные в работе результаты позволяют разрабатывать в короткие сроки и с минимальными затратами перспективные усилители с повышенной выходной мощностью и коэффициентом усиления в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн.

В отзывах имеются критические замечания.

1. АО «НПО «Радиоэлектроника» им. В.И. Шимко»:

- вопросы влияния трехмерных неоднородностей схемы в автореферате рассмотрены не достаточно полно: нет графиков отражающих это влияние на выходных характеристики усилителей и не указаны конкретные значения смещения центральной частоты и уровня выходной мощности.

- А.А. Маковецкой проведен достаточно большой объем исследований в этом направлении, на основе которых можно было бы сформулировать отдельно научное положение, непонятно почему это не сделано.

2. ООО «НПО «Синергетика»:

- в автореферате не достаточно четко указаны приближения, использованные при моделировании переноса заряда в структурах. Поэтому трудно судить об уровне влияния на дрейфовую скорость каждого из физических механизмов: поперечного пространственного переноса и квантования спектра в канале транзистора.

3. АО «НИИП имени В.В. Тихомирова»:

- из автореферата не ясно соответствие прогнозируемых характеристик усилителей их параметрам при массовом производстве и неизбежных при этом отклонениях характеристик входящих материалов и элементов схемы.

4. ИФП им. Ржанова СО РАН:

- Одним из результатов диссертации является утверждение, полученное на основе расчетов по гидродинамической модели, что всплеск дрейфовой скорости электронов в полевых транзисторах на основе GaN заметно ниже, чем

в приборах на GaAs. Между тем из автореферата не понятно, учитывалось ли при этих расчетах более высокое энергетическое положение боковых долин в GaN по сравнению с GaAs, что затрудняет междолинный переход электронов. Более того, меньшее значение всплеска дрейфовой скорости в GaN объясняется меньшим значением времени энергетической релаксации из-за более высокой частоты оптических фотонов. Однако их литературы известно (B.R. Readley, Hot electrons in low-dimensional structures, Rep. Prog. Phys. 54 (1991) 169-256), что значение времени энергетической релаксации при взаимодействии с полярными оптическими фононами прямо пропорционально квадратному корню из частоты фононов.

5. АО «Светлана-Электронприбор»:

- на основе предложенной автором методики не была построена нелинейная модель нового типа транзисторов DA-DpHEMT и проектирование усилителей мощности было проведено на основе линейной модели, что не позволило предсказать максимальные выходные СВЧ характеристики усилителей.

6. АО «Микроволновые системы»:

- на странице 4 автореферата утверждается, что создание нелинейной модели СВЧ транзистора по имеющимся в промышленности методикам «... может занимать от нескольких месяцев до полугода». Это утверждение ни на чем (кроме, возможно, опыта автора) не основано и неверно;

- во многих разделах текста автореферата (стр. 4, 5, 6, 11, 17) разрабатываемая автором методика названа «... методикой оперативного определения параметров ...», однако, в автореферате нет ни одной численной оценки этой «оперативности», или даже ее качественного обоснования, приводятся только аргументы в пользу точности определения параметров модели. Данное название методики представляется необоснованным.

7. НИИ систем электрической связи ТУСУР:

- в третьем защищаемом положении утверждается, что «При увеличении общей ширины затвора транзистора сохраняется преимущество DA-DpHEMT по удельной выходной мощности более чем в 1,5 раза. Это позволяет создавать в X-диапазоне частот усилители с выходной мощностью более 5 Вт». Однако из приводимых экспериментальных данных следует, что усилительные каскады на DA-DpHEMT с названными параметрами работоспособны в диапазонах С- и X-;

- недостаточно определено показаны границы применимости метода измерений, предложенного автором. Разумеется, что метод обеспечивает меньшую точность, чем современные контрольно-измерительные системы с управляемыми трансформаторами (Load Pull измерения), промышленными калибровочными мерами и использующие в качестве контактов – высокоточные зонды. Но простота метода и его доступность дают основание

при установленных границах достоверности результатов резко снизить затраты на обработку моделей транзисторов.

Во всех отзывах отмечается, что указанные недостатки не влияют на основные научные результаты работы и не снижают теоретической и практической ценности диссертации. Результаты, полученные автором, хорошо известны специалистам и неоднократно были представлены на отечественных и международных конференциях.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в области твердотельной СВЧ электроники и подтверждается списками публикаций в данной сфере исследований.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- разработан новый метод измерений, позволивший повысить точность и достоверность извлекаемых СВЧ характеристик дискретных полевых транзисторов из измеренных данных и уменьшающий влияние погрешности контактирования за счет проведения измерений транзистора в резонансной цепи;

- предложен нетрадиционный подход к оценке влияния различных физических механизмов на возрастание дрейфовой скорости электронов в канале нового типа полевых транзисторов, основанный как на непосредственных расчетах по гидродинамической модели, так и на экспериментально измеренных малосигнальных параметрах транзисторов;

- доказана теоретически обоснованная научная идея о том, что уменьшение поперечного пространственного переноса электронов в гетероструктурах нового типа приводит к уменьшению тепловой нагрузки на активный элемент посредством экспериментального получения следующей закономерности: при увеличении ширины затвора сохранилось преимущество транзисторов на гетероструктуре нового типа по сравнению с традиционными приборами;

- разработана схема усилительного каскада на транзисторе нового типа, демонстрирующая в X-диапазоне выходную мощность более 5 Вт в рабочей полосе частот более 25%, что соответствует удельной выходной мощности более 1 Вт на миллиметр ширины затвора.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что

- доказано положение о том, что локализация горячих электронов в узкозонном материале канала DA-DpHEMT приводит к увеличению в 1,4 – 1,6 раза их средней дрейфовой скорости под затвором и максимальной рабочей частоты транзистора по сравнению с DpHEMT. Этот результат имеет важное научное значение, заключающееся в расширении границ применения полевых

транзисторов на гетероструктурах, состоящих из материалов с шириной запрещенной зоны более 1 эВ вплоть до миллиметрового диапазона длин волн;

- изучены причинно-следственные связи, приводящие к увеличению дрейфовой скорости в канале DA-DpHEMT;

- применительно к проблематике диссертации эффективно, с получением обладающих новизной результатов использованы гидродинамические модели гетероструктурных полевых транзисторов и программы совместного решения уравнений Шредингера и Пуассона;

- изложена идея и аргументы, подтверждающие важность влияния уменьшения поперечного пространственного переноса горячих электронов между слоями гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием на температурный режим работы полевого транзистора;

- раскрыты новые проблемы, возникающие при разработке гибридных усилителей мощности, связанные с влиянием особенностей сборки на точность их проектирования;

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- разработан новый метод измерений СВЧ характеристик дискретных полевых транзисторов, основанный на предложенной автором согласующей микрополосковой схеме с переменным импедансом, и внедрен в процесс разработки СВЧ усилителей мощности в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Применение результатов измерений предложенным методом для построения нелинейных моделей позволило создать ряд серийных усилителей мощности X- и Ku-диапазонов, имеющих высокие выходные характеристики;

- определены перспективы практического использования гетероструктурных полевых транзисторов в усилителях мощности миллиметрового диапазона длин волн;

- доказано положение о том, что при увеличении общей ширины затвора транзистора с 0,4 до 4,8 мм сохраняется преимущество DA-DpHEMT перед DpHEMT по удельной выходной мощности более чем в 1,5 раза. Это позволяет создавать в X-диапазоне частот усилители с выходной мощностью более 5 Вт рабочей полосе частот более 25%, что соответствует удельной выходной мощности более 1 Вт на миллиметр ширины затвора.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

- работы по изготовлению и измерению характеристик ряда экспериментальных образцов в рамках НИР «Барьер» с использованием DA-DpHEMT гетероструктур с локализуемыми потенциальными барьерами показали воспроизводимость эффекта увеличения дрейфовой скорости электронов в канале транзистора и сохранения преимущества DA-DpHEMT с увеличением ширины затвора по удельной выходной мощности в 1,5 раза по сравнению с DpHEMT;

- теория, описывающая поперечный пространственный перенос электронов в мощных гетероструктурных полевых транзисторах, построена на основе известных математических моделях, в том числе нелинейных моделях полевых транзисторов с учетом их границ применимости, а также на программах моделирования, отработанных на большом объеме экспериментальных данных, и хорошо согласуется с опубликованными по теме диссертации экспериментальными данными;

- идея базируется на физике работы современных полевых гетероструктурных транзисторов и заключается в усилении локализации горячих электронов в слое InGaAs канала DpHEMT за счет формирования в AlGaAs слоях, окружающих канал высоких потенциальных барьеров с p-i-n профилем легирования;

- использованы известные методики измерения СВЧ характеристик выборочных совокупностей экспериментальных образцов DA-DpHEMT и DpHEMT транзисторов и усилительных каскадов на их основе;

- достоверность предложенного автором нового метода измерений характеристик транзисторов подтверждается результатами, полученными при разработке серийных СВЧ усилителей мощности с требуемыми характеристиками на основе построенных автором нелинейных моделей с различной шириной затвора и топологией.

Личный вклад соискателя состоит в следующем:

- соискателем лично выявлены физические механизмы, приводящие к значительному увеличению средней дрейфовой скорости под затвором DA-DpHEMT и проведена оценка этого увеличения;

- на основе теоретических расчетов определена область наиболее интенсивного тепловыделения в DA-DpHEMT;

- проведены экспериментальные исследования DA-DpHEMT и DpHEMT с различной шириной затвора и выявлена взаимосвязь улучшения температурного режима DA-DpHEMT и сохранения преимущества по удельной выходной мощности в 1,5 по сравнению с DpHEMT;

- рассчитана согласующая схема для DA-DpHEMT и проведены настройка и измерения характеристик экспериментальных образцов, на основе которых показано, что в X-диапазоне частот на новом типе транзистора можно получить в составе усилителя удельную выходную мощность более 1 Вт на миллиметр ширины затвора в рабочей полосе частот более 25%, что соответствует выходной мощности усилительного каскада более 5 Вт.

- разработана тестовая микрополосковая схема с регулируемым импедансом, предложен новый метод измерений СВЧ характеристик и основанная на них методика построения нелинейных моделей мощных дискретных полевых транзисторов;

- непосредственно соискателем на основе разработанной методики был построен ряд нелинейных моделей дискретных полевых транзисторов типа DrHEMT с различной общей шириной затвора и топологией, которые были применены при разработке ряда серийных усилителей мощности X- и Ku-диапазона;

- при непосредственном участии соискателя были определены основные причины, влияющие на точность проектирования современных гибридных усилителей мощности, использующих в своем составе согласующие элементы на керамике БСТ с высокой диэлектрической проницаемостью (бериллий-самарий-стронций);

- автором лично проведен анализ влияния промахов в задании длин соединительных проволок на выходные характеристики гибридных СВЧ усилителей мощности X-диапазона.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным действующим Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013.

На заседании 5 апреля 2018 года диссертационный совет принял решение присудить Маковецкой А.А. учёную степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 10 докторов наук по специальности 05.27.01. «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах», участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 1.

Заместитель председателя
диссертационного совета
д.ф.-м.н.



Панас Андрей Иванович

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н.



Куликова Ирина Владимировна

05.04.2018 г.