аттестационное дело № _____
дата защиты 26.05.2015 протокол № 25

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

Д409.001.01, созданного на базе Акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Исток» имени А.И. Шокина» в соответствии с приказом Рособрнадзора №2397-1817 от 07.12.2007 по диссертации Лукашина Владимира Михайловича на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Увеличение удельной выходной мощности и коэффициента усиления DpHEMT - транзисторов за счет повышения степени локализации горячих электронов в канале» в виде рукописи по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» выполнена в Акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Исток» имени А.И. Шокина» (АО «НПП «Исток» им. Шокина»), подразделение научно-производственный комплекс 4 (НПК-4).

Диссертация принята к защите «17» марта 2015г., протокол № 24.

Соискатель Лукашин Владимир Михайлович, гражданин РФ, старший научный сотрудник НПК-4 АО «НПП «Исток» им. Шокина».

В 1977 году соискатель окончил Московский институт электронного машиностроения по специальности «Полупроводниковое и электровакуумное машиностроение, космическое и радиационное материаловедение и приборостроение».

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

Официальные оппоненты:

1. Гарбер Геннадий Зеликович, гражданин РФ, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Открытого акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Пульсар».
2. Борисов Виталий Иванович, гражданин РФ, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук.

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, г. Москва, дала положительное заключение (заключение составил доктор физико-математических наук Галиев Галиб Бариевич, зав. лабораторией; утвердил доктор технических наук, профессор Мальцев Петр Павлович, директор ИСВЧПЭ РАН).

В отзыве ведущей организации отмечено, что актуальность работы обусловлена необходимостью создания широкой номенклатуры приборов с использованием отечественной элементной базы. Выходные характеристики полевых транзисторов, в свою очередь, определяются качеством используемых гетероструктур. Предложенные соискателем новые технические решения,

позволившие в опытных партиях СВЧ транзисторов увеличить удельную выходную мощность и коэффициент усиления более чем в полтора раза, несомненно, являются важными и значимыми как в научном, так и в практическом плане.

Таким образом, выбранная Лукашиным В.М. тема диссертации и выполненная по ней разработка нового типа транзисторов с использованием донорных двухсторонне δ-легированных HEMT структур с дополнением их p-i слоями ((DA)-DpHEMT структура) является актуальной.

Научная значимость результатов состоит в следующем:

Углублено понимание физических процессов, происходящих в канале гетероструктурных полевых транзисторов в условиях термополевого разогрева, нелокального транспорта и интенсивного поперечного переноса электронов. Это позволяет усовершенствовать конструкцию гетероструктур существующих транзисторов.

Обосновано, что за счет введения дополнительных потенциальных барьеров можно увеличить степень локализации электронов в канале и таким образом существенно снизить отрицательное влияние поперечного пространственного переноса электронов.

Показано, что в предложенных соискателем гетероструктурах удаётся достичь увеличения дрейфовой скорости электронов и, соответственно, тока, текущего через транзистор. Это, в свою очередь, улучшает выходные СВЧ характеристики полевых СВЧ транзисторов.

В качестве недостатков указывается следующее:

При использовании гидродинамической модели с одной эффективной длиной нет детального исследования применимости такой модели для широкозонных материалов.

Отсутствуют результаты квазигидродинамического моделирования современных транзисторов с донорным δ-слоем. При этом указано, что эта проблема не входила в постановку задачи.

Несколько замечаний относится к оформлению диссертации: на рис.25 и в подписях к нескольким таблицам стоило бы указать толщины слоёв, топологические размеры, дать графическое изображение параметров в виде таблицы и т.п.

Отмечено, что указанные замечания не снижают научную и практическую ценность полученных автором результатов.

В отзывах официальных оппонентов Гарбера Г.З. и Борисова В.И. также отмечается актуальность, новизна научного подхода, практическая значимость работы, соответствие работы требованиям п.9 «Положения», сделан вывод о присуждении соискателю искомой ученой степени. Имеющиеся недостатки связаны с отсутствием оценки погрешности, вносимой квазидвумерностью используемой гидродинамической модели, и отсутствием расчетных выходных ВАХ рассматриваемого транзистора (сравнение расчетных и экспериментальных ВАХ позволило бы оценить точность используемой квазидвумерной гидродинамической модели). Не все результаты обсуждаются с одинаковой степенью подробности: очень коротко описан процесс формирования омических контактов, не указан метод измерения их сопротивления; не приводятся ВАХ каналов сток-исток.

На автореферат получено 6 отзывов. Все отзывы положительные.

1. ТУСУР. Отзыв составил заведующий кафедрой физической электроники, д.т.н., профессор Троян П.Е.
2. ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН. Отзыв подготовил старший научный сотрудник, к.ф.-м.н. Протасов Д.Ю.
3. ФБГУ НИИ МЭИИТ. Отзыв подписал директор ФБГУ НИИ МЭИИТ, д.т.н. Соколов А.Б.
4. ИПТМ РАН. Отзыв подписал заместитель директора по науке, д.ф.-м.н. Вяткин А.Ф.
5. ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга. Отзыв составил начальник лаборатории, старший научный сотрудник, к.т.н. Радченко В.В.
6. ЗАО ЭЛМА-МАЛАХИТ. Отзыв составил главный научный сотрудник ЗАО «Элма-Малахит», к.т.н. Свешников Ю. Н.

Отмечается, что диссертация посвящена решению одной из важнейших проблем современной твердотельной электроники – увеличению удельной выходной мощности и коэффициента усиления СВЧ транзисторов с барьером Шоттки на основе псевдоморфных гетероструктур с высокой подвижностью электронов и двухсторонним легированием канала.

А.Ф. Вяткин и Ю.Н. Свешников в своих отзывах отмечают новизну полученных соискателем результатов, трактуемых как прорывное решение задачи, имеющей важнейшее практическое значение для развития современной СВЧ электронной компонентной базы. В других отзывах также отмечается, что впервые автором получен ряд новых важных научно-практических результатов, из которых можно выделить следующие.

В работе показано, что поперечный пространственный перенос горячих электронов приводит к существенному различию результатов, получаемых при гидродинамическом и температурном моделировании DpHEMT транзистора даже при длине затвора, намного превышающей длину релаксации импульса электронов.

Показано, что введение в DpHEMT гетероструктуру высоких локализующих потенциальных барьеров, уменьшающих поперечный перенос горячих электронов и повышающих плотность электронов в слое InGaAs канала, позволяет существенно увеличить выходную мощность и коэффициент усиления. Изготовлены экспериментальные образцы мощных СВЧ полевых транзисторов с длиной трапециевидного затвора 0,5 мкм, показавшие удельную мощность, коэффициент усиления и КПД на частоте 10 ГГц более 1,6 Вт/мм, 9 дБ, 50% соответственно.

Показано, что при оптимальном соотношении толщин i-p-i-(δ:Si) слоев структуры в барьере Шоттки (DA)-DpHEMT транзистора можно создавать мощные транзисторы, с максимумом выходной СВЧ мощности, достигаемом при напряжения «затвор – исток», равном нулю. Такие экспериментальные образцы мощных СВЧ полевых транзисторов с длиной Г - образного затвора 0,3 мкм показали удельную мощность, коэффициент усиления и КПД на частоте 10 ГГц более 1,5 Вт/мм, 12 дБ и 40%, соответственно.

Решена проблема формирования омических контактов истока и стока с линейной вольт-амперной характеристикой и малым удельным сопротивлением

при использовании в составе транзисторов гетероструктур с p-i-n локализующими барьерами.

Достоверность и практическая значимость полученных научных результатов подтверждается измерениями параметров экспериментальных образцов транзисторов, изготовленных на основе гетероструктур с потенциальными барьерами, существенно усиливающими локализацию горячих электронов в слое канала.

В ряде отзывов имеются критические замечания:

1) ТУСУР:

- недостаточно подробно изложено содержание разделов 2.3 и 2.5 диссертации, что не дает возможности оценить пути достижения результатов и создания качественных омических контактов.

2) ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН:

- в автореферате не указано, насколько увеличивается степень локализации двумерного электронного газа в гетероструктурах AlGaAs/InGaAs/GaAs с акцепторным легированием по сравнению с обычной гетероструктурой pHEMT, то есть, не сделана оценка количества уровней размерного квантования, дополнительно размещаемых в квантовой яме.

3) ФБГУ НИИ МЭИИТ:

- автор не приводит дальнейшие пути совершенствования разработанных структур, что могло бы еще сильнее обозначить значимость работы;
- не указаны конкретные изменения при оптимизации гетероструктур для серийных pHEMT транзисторов для дальнейших экспериментов.

4) ИПТМ РАН:

- в теоретической части работы излишне много внимания уделено гетеросистемам на основе нитрида галлия, представляющим самостоятельный интерес и имеющим косвенное отношение к теме работы;
- не приведены возможные направления дальнейшей оптимизации DpHEMT гетероструктур с локализующими барьерами для постановки последующих работ.

5) ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга:

- автор использовал известные до его работы методы расчета, поэтому первое научное положение в защите не нуждается;
- очевидная вещь, что любая гетероструктура с большим количеством слоев нуждается в оптимизации этих слоев, не понятно, какое научное положение хочет защитить автор на стр. 7 п.4 автореферата.

6) ЗАО ЭЛМА-МАЛАХИТ:

- было бы полезно и информативно дополнить результаты по гидродинамическому моделированию гетеропереходов различных видов детальным расчетом поперечных зонных диаграмм и поперечного распределения электронов в гетероструктуре, получаемых в стандартной DpHEMT гетеросистеме AlGaAs/InGaAs/GaAs при различных напряжениях, подаваемых на затвор транзистора.

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

В дискуссии приняли участие: д.т.н. Алыбин Вячеслав Георгиевич, с.н.с., начальник отдела ОАО « Российские космические системы»; к.т.н. Свешников Юрий Николаевич, главный научный сотрудник ЗАО «Элма-Малахит»; к.т.н. Лапин Владимир Григорьевич, начальник НПК-4 АО «НПП «Исток» им. Шокина»; к.т.н. Богданов Юрий Михайлович, начальник лаборатории НПК-4 АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Соискатель имеет 32 опубликованные работы, из них по теме диссертации опубликовано 24 научные работы общим объемом 61 печатный лист, в том числе 11 статей в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Соискателю выдано 6 патентов и 3 авторских свидетельства. 16 работ опубликованы в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. А.В. Климова, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский. Поперечный пространственный перенос в полевых транзисторах на гетероструктурах с селективным легированием и границы применимости квазигидродинамических моделей//Физика и Техника Полупроводников.- 2009. -Т. 43, В.1. -С. 113-118.
2. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, А.Б. Соколов. Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов//Письма в Журнал Технической Физики. -2012. -Т.38, В. 17. -С. 84-89.
3. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, Е.И. Голант, А.А. Капралова. Перспективы развития мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием// Физика и Техника Полупроводников. -2014. -Т. 48, В.5. -С. 684-692.
4. 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.
5. 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.
6. 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.-Т. 41, В. 3.- С. 81 – 87.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- разработана новая научная идея, заключающаяся в том, что ограничение выходных характеристик мощных гетероструктурных полевых транзисторов, обусловленное интенсивным поперечным пространственным переносом горячих электронов, может быть снято за счет создания дополнительных потенциальных барьеров;

- предложен новый способ подавления поперечного пространственного переноса электронов за счет введения в гетероструктуру дополнительных локализующих потенциальных барьеров, формируемых зарядами доноров и акцепторов в слоях AlGaAs;

- доказано, что введение локализующих потенциальных барьеров позволяет существенно уменьшить поперечный пространственный перенос электронов и, соответственно, значительно (более чем в 1,5 раза) увеличить удельную выходную СВЧ мощность и коэффициент усиления мощных гетероструктурных полевых транзисторов, что является заметным вкладом в развитие физики и технологии полупроводников и полупроводниковых приборов СВЧ электроники; доказано наличие закономерностей, выявляющих ранее неизвестные связи между параметрами конструкции транзисторных гетероструктур и удельной выходной СВЧ мощностью полевых транзисторов, вызванные поперечным переносом горячих электронов;

- введены: новое понятие «локализующий потенциальный барьер», новый термин (DA)-DpHEMT, обозначающий DpHEMT структуру или транзистор с селективным донорно-акцепторным легированием широкозонных слоев, окружающих слой канала.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- доказано положение о том, что из-за сильного поперечного пространственного переноса электронов при переходе от гидродинамической модели к температурной модели в результатах расчета характеристик полевых транзисторов на GaAs гетероструктурах с селективным легированием возникает погрешность более чем в 20 % при длинах затвора менее 1 мкм. В полевых транзисторах на GaN гетероструктурах из-за большой энергии оптического фонона и, соответственно, малого всплеска дрейфовой скорости электронов такая же погрешность возникает при длинах затвора менее 0,05 мкм;

- применительно к проблематике диссертации эффективно, с получением обладающих новизной результатов использованы гидродинамические и температурные модели гетероструктурного полевого транзистора;

- изложена идея и аргументы, подтверждающие важность влияния поперечного переноса горячих электронов в широкозонные слои, окружающие канал транзистора, на выходные СВЧ характеристики;

- изучены причинно-следственные связи, приводящие к интенсивному поперечному пространственному переносу горячих электронов и предложены возможные варианты его подавления в новых типах гетероструктур;

- раскрыта новая проблема в конструкции омического контакта в (DA)-DpHEMT транзисторе и предложено ее решение;

- проведена модернизация существующей программы расчета характеристик гетероструктурного полевого транзистора в гидродинамической

и температурной моделях, учитывающая поперечный перенос электронов и обеспечивающая получение новых результатов по теме диссертации.

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

- разработаны и апробированы в составе экспериментальных партий транзисторов НИР «Барьер» гетероструктуры с локализующими потенциальными барьерами, все транзисторы на основе этих структур показали стабильное увеличение удельной выходной СВЧ мощности и коэффициента усиления;
- определены пределы применимости гидродинамической и температурной моделей транзисторов, используемых в практике проектирования транзисторов;
- создана система практических рекомендаций по изменению конструкции и профиля легирования существующих DpHEMT гетероструктур и по необходимым изменениям конструкции омического контакта в (DA)-DpHEMT транзисторе;
- представлены предложения по дальнейшему совершенствованию конструкции мощных полевых транзисторов, увеличивающих удельную выходную СВЧ мощность и коэффициент усиления этих приборов;
- доказано положение о том, что введение в AlGaAs слои DpHEMT гетероструктуры достаточно высоких локализующих потенциальных барьеров позволяет создавать мощные ПТШ с удельной мощностью, коэффициентом усиления и КПД более 1.6 Вт/мм, 9.5 дБ и 50% соответственно при длине трапециевидного затвора 0.5 мкм;
- доказано положение о том, что использование при изготовлении омических контактов истока и стока в (DA)-DpHEMT транзисторах заглубления с удаленными акцепторными слоями позволяет формировать омические контакты с линейной ВАХ и удельным сопротивлением менее 0.9 Ом·мм – на уровне результатов, типичных для DpHEMT транзисторов;
- доказано положение о том, что при задании определенного соотношения толщин i-p-i-(δ:Si) слоев структуры в барьере Шоттки (DA)-DpHEMT транзистора, можно создавать мощные ПТШ, с максимумом выходной СВЧ мощности, достигаемом при напряжении на затворе, равном нулю.

Оценка достоверности результатов исследования основана на том, что:

- работы по изготовлению и измерению характеристик ряда экспериментальных образцов транзисторов в НИР «Барьер» с использованием (DA)-DpHEMT гетероструктур с локализующими потенциальными барьерами показали воспроизводимость эффекта существенного увеличения выходной СВЧ мощности и коэффициента усиления приборов;
- теория, описывающая поперечный пространственный перенос электронов в мощных гетероструктурных полевых транзисторах, построена на основе известных исходных уравнений, согласуется с опубликованными по теме диссертации экспериментальными результатами;
- идея базируется на физике работы современных полевых гетероструктурных транзисторов и заключается в усилении локализации

горячих электронов в слое InGaAs канала за счет применения (DA)-DpHEMT гетероструктур с локализующими потенциальными барьерами в AlGaAs-слоях с (p−i−n) профилем легирования;

- использованы результаты расчетов продольного распределения энергии электронов по слоям гетероструктуры, полученные в гидродинамической модели с учетом поперечного переноса электронов, в сравнении с результатами, полученными в температурной модели, необходимыми для задания p−i−n профиля легирования структур;

- установлено, что в соответствии с изученными причинно-следственными связями, приводящими к интенсивному поперечному пространственному переносу горячих электронов, введение в гетероструктуру локализующих потенциальных барьеров позволяет более чем в 1,5 раза увеличить максимальную величину удельной выходной СВЧ мощности;

-использованы современные методики измерения СВЧ характеристик выборочных совокупностей экспериментальных образцов (DA)-DpHEMT транзисторов.

Личный вклад соискателя состоит в следующем:

- соискателем лично выявлены физические механизмы и предложены технические решения, дающие существенное увеличение выходной мощности и коэффициента усиления в DA-pHEMT транзисторах;
- при непосредственном участии соискателя предложена конструкция гетероструктуры с локализующими потенциальными барьерами, формируемыми методом задания (p−i−n) - профиля легирования в AlGaAs-слоях, окружающих слой InGaAs канала;
- при непосредственном участии соискателя изготовлены первые экспериментальные образцы (DA)-DpHEMT транзисторов с удельной мощностью более 1,6 Вт/мм;
- при непосредственном участии соискателя получены первые экспериментальные результаты разработки полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно – акцепторным легированием ((DA)-DpHEMT);
- соискателем лично предложена идея улучшения омических контактов в (DA)-DpHEMT транзисторах и при его непосредственном участии получены экспериментальные результаты по уменьшению сопротивления омических контактов в таких транзисторах;
- при включенном участии соискателя проведено исследование границ применимости температурных моделей для расчёта характеристик гетероструктурных полевых транзисторов на основе GaAs в условиях интенсивного поперечного пространственного переноса электронов;
- при включенном участии соискателя проведено исследование границ применимости температурных моделей для расчета характеристик полевых транзисторов на основе нитрида галлия;
- при непосредственном участии соискателя предложено решение по управлению положением оптимальной рабочей точки мощного гетероструктурного полевого транзистора за счет формирования специальной формы подзатворного потенциального барьера методом донорно-акцепторного легирования структуры, и приведены экспериментальные данные по таким

транзисторам, наиболее эффективно работающим при нулевом смещении на затворе.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием основной идейной линии, заключающейся в следующем:
- в исследовании физических процессов, приводящих к ограничению удельной выходной СВЧ мощности в серийных DpHEMT транзисторах величиной, близкой к 1 Вт/мм,
- в выявлении важности отрицательного влияния поперечного переноса горячих электронов из канала транзистора,
- в предложении конструкции и изготовлении экспериментальных образцов новых типов гетероструктур с подавленным поперечным переносом и усиленной локализацией горячих электронов в слое канала,
- в разработке и изготовлении экспериментальных образцов транзисторов на основе предложенных новых типов гетероструктур,
- в существенном увеличении удельной выходной СВЧ мощности экспериментальных образцов транзисторов на основе предложенных гетероструктур.

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, и на заседании 26.05.2015 г. принял решение присудить Лукашину Владимиру Михайловичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 11 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за - 19, против - нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета
д.т.н. Борисов Александр Анатольевич

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета
д.т.н. Куприянов Павел Васильевич

29.05.2015 г.