РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН)

117105, г. Москва, Нагорный проезд д. 7, стр. 5
тел./факс 8 (499) 123-44-64
e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru, isvch@isvch.ru
www.isvch.ru
ОКПО 58725825, ОГРН 1027726000180
ИНН/КПП 7726318050/772601001

«____»_____ 20____ г. № _____
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИСВЧПЭ РАН
д-р тех. наук, профессор
Малышев П.П.

_____
06.04.2015 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) на диссертацию Лукашина Владимира Михайловича «Увеличение удельной выходной мощности и коэффициента усиления DPHEMT-транзисторов за счёт повышения степени локализации горячих электронов в канале», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро-и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Диссертационная работа Лукашина В.М. посвящена актуальной проблеме – разработке нового типа транзисторов с использованием широко применяемых в настоящее время PHEMT-гетероструктур типа AlGaAs/InGaAs/GaAs на подложках GaAs. Подобные структуры являются основой для электронной компонентной базы (ЭКБ) в твердотельной

сверхвысокочастотной (СВЧ) электронике. На их основе создаются усилители мощности на полевых транзисторах, которые остаются широко востребованными для разработки большого числа всевозможных радиоэлектронных систем.

1 Актуальность работы

Мощные полевые транзисторы являются основным активным элементом твердотельных усилителей мощности и остаются одними из основных элементов для создания ЭКБ. Они используются в передающих каналах РЛС, активных фазированных антенных решётках (АФАР), системах связи, аппаратуре радиоэлектронного противодействия и специального назначения. Требования экономической независимости и национальной безопасности приводят к необходимости создания большого числа приборов с использованием только отечественной элементной базы. Выходные характеристики полевых транзисторов, в свою очередь, определяются, во-первых, качеством, а во-вторых, дизайном используемых гетероструктур. Поэтому любые удачные решения в области совершенствования и улучшения гетероструктур для изготовления полевых транзисторов, безусловно, являются важными и значимыми как в научном, так и в практическом плане. Использование предложенных соискателем новых технических решений, которые позволили повысить в опытных партиях СВЧ транзисторов удельную мощность и коэффициент усиления более чем в полтора раза, несомненно, сильно повысили значимость полученных в диссертационной работе результатов.

Таким образом, выбранная Лукашиным В.М. тема диссертации и выполненная по ней работа по разработке нового типа транзисторов с использованием двухсторонне δ-легированных HEMT (DPHEMT) структур с дополнением их слоями с локализующими потенциальными барьерами за счёт введения тонких акцепторных слоёв в DPHEMT-структуру (DA-DPHEMT структура) является актуальной как с научной, так и с практической точек зрения.

2 Новизна проведённых исследований и полученных результатов

Для решения поставленных в диссертации проблем соискателем использован комплексный подход: математическое моделирование и экспериментальное исследование особенностей нелокального разогрева электронов в канале гетероструктурных полевых транзисторов в условиях сильного термополевого разогрева и интенсивного поперечного переноса электронов между слоями гетероструктуры. В работе впервые получены следующие научно-технические результаты.

- Проанализировано и показано, что поперечный пространственный перенос и сильные зависимости времён релаксации от энергии приводят

к тому, что результаты расчетов по гидродинамической и температурной моделям (по ГДМ и ТМ) существенно отличаются при длинах затворов, намного превышающих длины релаксации импульса электронов в слоях гетероструктур. В сравнении с результатами ГДМ получены величины погрешностей, возникающих при использовании ТМ при моделировании и расчете характеристик PHEMT транзисторов.

- Исследованы особенности нелокального разогрева электронов в полевых транзисторах на основе GaN и GaAs. Показано, что из-за сильного эффекта всплеска дрейфовой скорости средняя величина дрейфовой скорости под затвором транзистора на основе GaAs выше, чем под затвором транзистора на основе GaN при большей величине максимальной сильнополевой статической дрейфовой скорости электронов в GaN. Эта особенность сравнительного поведения величин средней дрейфовой скорости в GaN и GaAs транзисторах сохраняется даже при искусственном задании величины слабополевой подвижности электронов в GaAs такой же, как в GaN.
- Несомненным серьезным достижением автора является то, что в своей диссертации он впервые продемонстрировал, что введение в DPHEMT гетероструктуру высоких локализующих потенциальных барьеров уменьшает поперечный пространственный перенос электронов с сопутствующим подавлением проникновения горячих электронов в эти барьеры при усилении эффекта размерного квантования и обеспечивает увеличение плотности электронов в слое InGaAs канала, и это позволяет существенно увеличить выходную мощность и коэффициент усиления ПТШ.
- Автор впервые предложил и продемонстрировал, что оптимизируя соотношение толщин i-p-i-(δ: Si) слоёв структуры в барьере Шоттки (DA)-DPHEMT транзисторных гетероструктур, можно создавать мощные ПТШ, с максимумом выходной СВЧ мощности, достигаемом при задании напряжения «затвор – исток», равного нулю.
- В диссертации решена сложная проблема формирования истоковых и стоковых электродов с линейной вольт-амперной характеристикой и малым удельным сопротивлением методом формирования омических контактов в заглублениях с удаленными акцепторными слоями.

3 Значимость результатов диссертации для науки

Оценка основных научных результатов диссертационной работы Лукашина В.М. показывает, что они могут быть использованы при разработке нового типа арсенидгаллиевых полевых транзисторов на основе предложенных автором гетероструктур нового типа с донорно-акцепторным легированием для создания усилителей мощности. Эти результаты создают необходимый научно-технический задел для разработки БИС приемных, передающих и приемо-передающих модулей, в том числе для АФАР.

Научная значимость результатов диссертационной работы 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 вносить усовершенствование в конструкцию гетероструктур существующих транзисторов.
- Обосновано, что за счёт введения дополнительных потенциальных барьеров можно увеличить степень локализации электронов в канале и, таким образом, резко снизить роль поперечного пространственного переноса электронов.
- Показано, что в предложенных гетероструктурах удаётся достичь увеличения скорости электронов и, соответственно, тока, текущего через СВЧ транзистор. Это, в свою очередь, улучшает выходные характеристики полевых СВЧ транзисторов.

4 Значимость результатов диссертационной работы для производства

Практическая значимость результатов диссертационной работы состоит в следующем:

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

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

3. Разработанные технические решения, описанные в диссертации, использованы при изготовлении ряда экспериментальных образцов транзисторов в (DA)-DPHEMT исполнении. Показано, что применение этих решений позволило:

- при длине трапециевидного затвора, равной 0,5 мкм изготовить экспериментальные образцы мощных ПТШ с удельной мощностью, коэффициентом усиления и КПД на частоте 10 ГГц более 1,6 Вт/мм, 9 дБ, 50% соответственно,

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

5 Заключение о соответствии диссертации требованиям ВАК РФ к публикациям

Изложенные в диссертации материалы представляют собой законченную работу по выбранной теме, достаточно и в полной мере иллюстрированы. Надёжность и достоверность результатов подтверждена публикациями в журналах, входящих в перечень рецензируемых журналов ВАК.

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах. По материалам работ получено 3 патента РФ на полезную модель. Полученные результаты прошли апробацию на 9-ти международных и российских конференциях.

Диссертация и автореферат написаны в хорошем научном стиле грамотным языком. Сформулированные результаты представлены в ясной и понятной форме.

Диссертационная работа Лукашина В.М. отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям в п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.

6 Рекомендации по дальнейшему использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты работы внедрены в опытные партии транзисторов в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Научные и практические результаты могут быть рекомендованы к использованию на предприятиях, занимающихся разработкой и производством СВЧ МИС на мощных полевых транзисторах, а также предприятиях, занимающихся проектированием приемопередающих активных фазированных антенных решеток, таких, как: АО «НИИМА «Прогресс», ОАО «НПП «Пульсар», АО «Радиофизики», НТЦ МНИИРЭ «Альтаир», АО «ГСКБ «Алмаз-Антей».

7 Недостатки и замечания по диссертационной работе

Представленной диссертационной работе свойственны и недостатки.

1. На наш взгляд, при использовании гидродинамической модели с одной эффективной длиной нет детального исследования применимости такой модели для широкозонных материалов.

2. Отсутствуют результаты квазигидродинамического моделирования современных транзисторов с донорным δ-слоем (хотя справедливости ради отметим, что это не входило в постановку задачи).

3. На рисунке 25 (стр. 73) или в описании к нему стоило бы указать толщины слоёв такой новой, предложенной структуры.

4. Затрудняет чтение диссертации отсутствие в подписях к таблицам № 2 (стр. 79), № 3 (стр. 84), № 4 (стр. 86) и № 5 (стр. 87) топологических размеров (ширина и длина затворов, тип затвора). Если бы эти данные были в подписях к таблицам, это существенно бы облегчило чтение диссертации.

5. Следовало бы более детально описать DPHEMT гетероструктуру. Это помогло бы быстрее оценить безусловное достоинство предложенной совершенно новой гетероструктуры DPHEMT.

6. Усложняет чтение автореферата отсутствие в нём графического изображения параметров (DA)-DPHEMT гетероструктуры (в виде рисунка либо таблицы). На наш взгляд, таблицу № 1, представленную на стр. 77 диссертации, стоило бы внести также и в автореферат.

Несмотря на отмеченные недостатки диссертационная работа Лукашина В. М. оставляет хорошее впечатление. Она, безусловно, интересна как в научном, так и в практическом плане, представляет собой законченный научный труд, выполнена на актуальную и злободневную тему, имеет достаточно высокий научно-технический уровень.

Диссертация Лукашина В. М. «Увеличение удельной выходной мощности и коэффициента усиления DpHEMT – транзисторов за счет повышения степени локализации горячих электронов в канале» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний.

Название работы отвечает её содержанию. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и оформлен в соответствии с требованием ВАК. Основные результаты работы достаточно полно отражены в публикациях в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, и прошли апробацию на российских конференциях.

Диссертационная работа Лукашина В.М. отвечает всем требованиям ВАК - п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Результаты и выводы, изложенные в диссертации, обоснованы и достоверны. Автор работы Лукашин Владимир Михайлович, несомненно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро-и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Диссертационная работа и доклад Лукашина В.М. заслушивались и обсуждались на учёном совете ИСВЧПЭ РАН 24 марта 2015 г. (протокол учёного совета № 3).

Зав. лабораторией исследования процессов формирования низкоразмерных электронных систем в наногетероструктурах соединений A^3B^5, д-р физ.-мат. наук

Галиев Г.Б.

Подпись Галиева Г.Б. заверяю

Учёный секретарь ИСВЧПЭ РАН,
канд. физ.-мат. Наук Хабибуллин Р.А.