



Министерство науки и высшего
образования Российской Федерации

Федеральное государственное
автономное научное учреждение
Институт сверхвысокочастотной
полупроводниковой электроники
им. В.Г. Мокерова
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

«15» 05 20 23 г. № 23-И/161
На № _____ от _____

В диссертационный совет
74.1.008.01 при
АО НПП «Исток» им. А.И. Шокина»

141190, Московская область,
г. Фрязино, дом 2а

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИСВЧПЭ РАН
доктор технических наук, профессор

С.А. Гамкредидзе

«» 2023г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Лукашина Владимира Михайловича «Гетероструктурные СВЧ полевые транзисторы с селективным донорно-акцепторным легированием», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

Благодаря целенаправленной политике развития всех направлений микроэлектроники, проводимой на западе и большим инвестициям, произошло значительное улучшение технологий широкозонных материалов, в частности технологий нитрид галлиевых (GaN) эпитаксиальных структур. Как GaN

транзисторы, так и усилители мощности на основе GaN транзисторов существенно потеснили изделия на основе арсенида галлия (GaAs) на рынке СВЧ электроники. Однако, следует отметить, что основную часть рынка до сих пор занимают изделия на основе GaAs эпитаксиальных структур. В России имеются большие проблемы с освоением промышленных технологий транзисторов на основе широкозонных материалов и с финансированием их разработок. Кроме того, полевые транзисторы на основе гетероструктур с GaAs подложкой обладают рядом специфических преимуществ, например, высокой линейностью и коэффициентом усиления, и в этой области промышленным транзисторам на основе GaN с ними пока сложно конкурировать. Совокупность этих факторов определяет актуальность диссертационной работы В.М. Лукашина, в которой представлены результаты разработки усовершенствованной конструкции транзисторов с InGaAs каналом - DA-DpHEMT транзисторов, проведенной в направлениях разработки новых гетероструктур, конструкции и технологии изготовления омических контактов и затворов, конструкции и технологии изготовления дополнительных теплоотводящих элементов. Полученные результаты позволили в разы улучшить выходные характеристики транзисторов с InGaAs каналом и продвинуться в мм – диапазон рабочих частот, причем оставаясь в рамках технологии рHEMT гетероструктур, имеющих сравнительно низкую себестоимость, особенно по отношению к GaN гетероструктурам на основе карбид кремниевых (SiC) подложек. По этим причинам полученные результаты безусловно являются важными и актуальными.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа выполнена на 391 странице текста, содержит 111 рисунков, 19 таблиц и список литературы из 305 наименований. Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с действующими требованиями ВАК России. Работа изложена ясным научным языком.

Во введении обоснована актуальность работы. Сформулированы цели и задачи, решаемые в диссертации. Отмечены научная и практическая ценность результатов работы, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведено исследование дрейфового переноса электронов в транзисторных НЕМТ гетероструктурах, на основе которого предложены и описаны способы улучшения характеристик НЕМТ транзисторов.

Во второй главе приведено описание и результаты разработки мощных полевых СВЧ DA-DpHEMT транзисторов для см- и мм- диапазонов длин волн.

В третьей главе описаны тепловые режимы, распределения температуры и результаты расчетов максимальной температуры в транзисторах.

В заключении представлены основные полученные результаты.

Анализ содержания диссертации В.М. Лукашина показывает, что в работе представлен ряд новых важных для практики результатов, полученных автором, в частности:

показано, что сформированные с помощью селективного легирования донорами и акцепторами локализирующие барьеры в DA-DpHEMT транзисторах с InGaAs каналом и с AlGaAs - интерфейсом канала увеличивают стационарную дрейфовую скорость и всплеск дрейфовой скорости электронов до величин, превышающих аналогичные величины в DpHEMT транзисторах с таким же InGaAs каналом до 1.5 раз даже при с AlInAs - интерфейсе канала;

в DA-DpHEMT транзисторах для см - и мм - диапазонов длин волн предложено формировать алмазоподобные теплоотводы на боковых стенках заземляющих отверстий, что позволяет до двух раз уменьшить перегрев DA-DpHEMT транзистора относительно корпуса при толщине подложки 100 мкм и ширине секций затворов 150 мкм;

DA-DpHEMT транзисторы для см - диапазона показали удельную выходную СВЧ мощность и коэффициент усиления в 1.5 – 2 больше, чем у полевых транзисторов на традиционных DpHEMT структурах. СВЧ DA-DpHEMT транзисторы для мм - диапазона показали малосигнальный коэффициент усиления (MSG) более 15 дБ в диапазоне частот 25 – 55 ГГц, более 10 дБ при частоте 67 ГГц;

показано, что DA-DpHEMT транзисторы при 22 % содержании индия в слое канала, позволяют получать пробивное напряжение «затвор – сток» более 30 В при увеличении расстояния затвор - сток до 0.9 мкм без падения коэффициента усиления.

Результаты работы докладывались на 27 российских и международных конференциях и опубликованы в одной монографии, в 33 научных изданиях из списка рекомендованных ВАК России и в 34 публикациях в материалах конференций. Получено 9 патентов Российской Федерации.

Практическая значимость работы состоит в том, что идеи и конструкции автора были воплощены в новых моделях и технологиях, которые позволили:

построить модель, позволяющую определять перспективность использования в составе транзисторов различных вариантов гетероструктур, проводить выбор оптимального состава, толщин слоев и профиля легирования;

предложить новый тип гетероструктур для мощных СВЧ полевых транзисторов, получивших название «DA-DpHEMT структуры» с потенциальными барьерами, усиливающими локализацию горячих электронов в слое канала;

разработать конструкции нового класса мощных СВЧ транзисторов для см - и мм - диапазонов. Показать, что благодаря высокой точности позиционирования фотолитографического степпера можно формировать Г - затворы с длиной основания от 0,12 мкм высокопроизводительными методами фотолитографии и, тем самым, обеспечить серийное изготовление транзисторов как для см -, так и для мм - диапазонов длин волн при рабочих частотах 10–100 ГГц;

сформировать затвор транзистора с длиной основания в 2 – 3 раза меньше, чем разрешение используемого литографического оборудования;

разработать и апробировать ряд вспомогательных технологий:

- формирование мезы транзистора с плоскими наклонными стенками,
- удаление окисленных слоев и слоев с дефектами от плазменных обработок методом окисления этих слоев и селективного удаления окислов,

- формирование в одном чипе Г – затворов при различных ориентациях козырьков относительно ножек затворов;

повысить воспроизводимость характеристик транзисторов;

увеличить выходную мощность и коэффициент усиления DA-DpHEMT транзисторов в 1,5 – 2 раза по сравнению с традиционными DpHEMT транзисторами.

Новые результаты, полученные соискателем используются либо в серийно выпускаемой продукции АО «НПП «Исток» им. А.И. Шохина», либо в опытных образцах. Экономическая значимость работы состоит в использовании результатов диссертации в серийном производстве, приводящего к увеличению выхода годной продукции.

Достоверность и обоснованность результатов исследования подтверждается использованием общепринятых методов моделирования и корреляцией экспериментальных данных с результатами расчётов. Измерения проводились на высокоточных поверенных измерителях сигналов. Полученные результаты и выводы не противоречат данным, опубликованным в российской и зарубежной научной литературе.

Основные положения, выносимые на защиту, обосновываются в ходе изложения материала в диссертационной работе и в публикациях автора. Автореферат в должной мере отражает основное содержание диссертации.

К недостаткам работы можно отнести определённую грубость моделирования всплеска дрейфовой скорости электронов в DA-DpHEMT транзисторах. Проблемы электронного транспорта лучше исследовать на основе решения кинетического уравнения.

Имеется также ряд опечаток в тексте и в формулах.

Приведенные замечания не снижают значимости и достоверности научных результатов, полученных соискателем. Диссертация В.М. Лукашина «Гетероструктурные СВЧ полевые транзисторы с селективным донорно - акцепторным легированием» является законченной квалификационной научно-исследовательской работой. В ней решен ряд научных и технических проблем по совершенствованию гетероструктур и конструкции транзисторов, а также по совершенствованию технологии их создания, направленный на адаптацию конструкции и технологии транзисторов в серийное производство.

Объём и качество полученных результатов, а также их практическая и научная значимость позволяют сделать заключение том, что квалификация Лукашина Владимира Михайловича соответствует ученой степени доктора технических наук.

Диссертация Лукашина Владимира Михайловича «Гетероструктурные СВЧ полевые транзисторы с селективным донорно - акцепторным легированием» отвечает требованиям ВАК – п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН).

Адрес: 117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр.5

Тел.: 8 (495) 280-75-48

Электронная почта: isvch@isvch.ru

Сайт: <https://new.isvch.ru>

Заместитель директора по научной работе ИСВЧПЭ РАН,
кандидат физико-математических наук, доцент



Д.С. Пономарев