



НИЦ "Курчатовский институт"

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](mailto:iuhfseras2010@yandex.ru), [isvch@isvch.ru](mailto:isvch@isvch.ru)  
[www.isvch.ru](http://www.isvch.ru)

ОКПО 58725825, ОГРН 1027726000180  
ИНН/КПП 7726318050/772601001

« 18 » 03 2024 г. № 24-44/106  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

В диссертационный совет  
74.1.008.01  
АО «НПП «Исток» им. Шокина  
141190, г. Фрязино, Московская  
область,  
ул. Вокзальная, дом 2а, корпус 1

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ИСВЧПЭ РАН  
доктор технических наук, профессор

С.А. Гамкредидзе

« 18 » 03 2024 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Терешкина Евгения Валентиновича «Обращенные гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами для увеличения коэффициента усиления полевых транзисторов миллиметрового диапазона длин волн», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Эффективность и тактико-технические характеристики современной и перспективной аппаратуры связи и радиолокации, в том числе космического базирования, находятся в прямой зависимости от функциональных и эксплуатационных параметров используемых в них СВЧ модулей, которые, в свою очередь, во многом определяются схемотехникой и технологией изготовления

используемых изделий электронной компонентной базы (ЭКБ). Создание СВЧ ЭКБ, удовлетворяющих комплексу требований процессов высокоскоростной и высокоточной обработки сигналов является сложной прикладной научной задачей, связанной, прежде всего, с освоением перспективных технологических методов. Однако, следует отметить, что основную часть отечественного рынка СВЧ электроники до сих пор занимают изделия на основе GaAs эпитаксиальных структур. 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 нитриде галлия (GaN) с ними пока сложно конкурировать. Это и определяет актуальность диссертационной работы Е.В. Терешкина, в которой представлены результаты разработки усовершенствованной конструкции транзисторов с InGaAs каналом и донорно-акцепторным легированием за счет дополнительного введения в эти структуры набора тонких, толщиной в несколько атомных слоев, потенциальных барьеров на основе AlAs (цифровых барьеров). Полученные результаты позволили в разы улучшить выходные характеристики транзисторов с InGaAs каналом и продвинуться в миллиметровый диапазон длин волн, причём оставаясь в рамках технологии рНЕМТ гетероструктур, имеющих сравнительно низкую себестоимость, особенно по отношению к GaN гетероструктурам на основе карбидкремниевых (SiC) подложек. По этим причинам полученные результаты безусловно являются важными и актуальными.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, раскрывающих основные научные положения и практические результаты, заключения и списка литературы. Работа выполнена на 164 страницах текста, содержит 43 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 132 наименований. Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с ГОСТ и действующими требованиями ВАК РФ. Работа изложена ясным и четким научным языком.

Во введении обоснована актуальности работы. Сформулированы цели и задачи исследований, перечислены основные результаты, выводы и рекомендации, научные положения, выносимые на защиту. Обоснована практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены различные типы гетероструктур и способы описания в них электронного транспорта.

Во второй главе рассмотрен всплеск дрейфовой скорости электронов в классических транзисторных гетероструктурах на основе нитрида галлия и арсенида галлия.

В третьей главе экспериментально и теоретически исследованы первые транзисторные гетероструктуры с цифровыми потенциальными барьерами Q-DpHEMT.

В четвертой главе рассмотрены перспективы использования обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами в транзисторах миллиметрового диапазона длин волн.

В заключении представлены основные полученные результаты.

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

1. На основе теоретических исследований показано, что за счет близости электронных транспортных свойств материалов гетероструктуры, в области сильного поля для гетероструктур на основе GaN поперечный пространственный перенос электронов уменьшает всплеск их дрейфовой скорости по сравнению с чистым объёмным материалом, менее чем на 30%.

2. На структурах с цифровыми потенциальными барьерами изготовлены полевые транзисторы с длиной затвора около 0,12 мкм. Показано, что за счёт роста всплеска дрейфовой скорости электронов при введении цифровых барьеров в гетероструктуры с двухсторонним донорно-акцепторным легированием до двух раз увеличивается коэффициент усиления полевых транзисторов на их основе.

3. На основании расчетов из решения самосогласованной системы уравнений Шредингера-Пуассона показано, что введение цифровых барьеров в обращённые гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием позволяет создавать проводящий канал с расстоянием между первыми квантовыми уровнями в три – четыре раза больше энергии оптического фонона.

4. На основании расчетов по самосогласованной модели из системы уравнений Шредингера-Пуассона и гидродинамических уравнений показано, что введение цифровых барьеров в обращённые гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием за счет локализации горячих электронов в канале и отсутствия переходов на состояния, локализованные в барьерных решётках до двух раз увеличивает всплеск дрейфовой скорости электронов в области сильного поля.

5. Теоретически показано, что в обращённых гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием выполнение цифровой барьерной решётки в области легирования с шагом 6 и менее монослоёв GaAs за счет локализации горячих электронов в канале обеспечивает увеличение всплеска их дрейфовой скорости в области сильного поля до его величины в чистом объёмном материале.

6. На основании расчетов по самосогласованной модели включающей систему уравнений Шредингера-Пуассона и гидродинамических уравнений показано, что в обращённых гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием выполнение цифровой барьерной решётки в области легирования с шагом 6 и менее монослоёв GaAs за счет локализации горячих электронов в канале, позволяет вдвое поднять поверхностную плотность электронов при уменьшении всплеска их дрейфовой скорости в области сильного поля менее чем на 10 %.

7. Теоретически показано, что в гетероструктурах полевых транзисторах крутизна транзистора и входная емкость обратно пропорциональны расстоянию от затвора до центра канала.

Результаты работы докладывались на 7 российских и международных конференциях и опубликованы в 5 работах в журналах, индексируемых в международных базах данных, 4 работах в журналах из списка ВАК для защиты кандидатских диссертаций (1 без соавторов) и в 8 публикациях в материалах конференций. Получено 2 патента Российской Федерации.

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

1. Изготовить транзисторы с длиной затвора 0,12 мкм имеющие пробивное напряжение около 30 В, при коэффициенте усиления до 20 дБ на частоте 40 ГГц.
2. Разрабатывать новые эффективные гетероструктуры для мощных полевых транзисторов коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн.
3. Разрабатывать мощные полевые транзисторы с повышенным коэффициентом усиления в коротковолновой части сантиметрового и миллиметров диапазонов длин волн.

Новые результаты, полученные соискателем, используются в опытных образцах продукции АО «НПП «Исток им. А.И. Шокина». Экономическая значимость работы состоит в использовании результатов диссертации в серийном производстве, что приведет как к удешевлению продукции, так и увеличению выхода годных изделий.

Достоверность и обоснованность результатов исследований 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 полной мере отражает основное содержание диссертации.

К недостаткам работы можно отнести определённую грубость используемых теоретических моделей электронного транспорта. Подобные проблемы лучше исследовать на основе решения кинетического уравнения.

Имеется ряд опечаток в тексте и в формулах.

Однако отмеченные недостатки не снижают ценности диссертационной работы и ее практической значимости. Материалы диссертационного исследования свидетельствуют о научной зрелости диссертанта, способного решать научно-теоретические и практически значимые проблемы конструирования обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами и СВЧ транзисторов миллиметрового диапазона длин волн.

Принимая во внимание актуальность темы диссертации, уровень ее научной новизны, теоретическую и практическую значимость полученных результатов, можно утверждать, что Терешкин Е.В. в целом справился с поставленными целями и задачами исследования.

Диссертационная работа Терешкина Е.В. представляет собой самостоятельное и целостное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне и являющееся законченной научной-квалификационной работой. Результаты исследований имеют научную новизну, а также теоретическую и практическую значимость и получены в достаточно новой и перспективной области исследований. Автореферат диссертации отражает её содержание. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в АО «НПП «Исток» им. Шокина» и в других предприятиях радиоэлектронной промышленности, занимающихся разработкой и производством СВЧ транзисторов и приемо-передающих модулей миллиметрового диапазона длин волн и радиоэлектронной аппаратуры на их основе.

Диссертационная работа Терешкина Е.В., её содержание, цель, постановка задач и методы их решения, а также полученные автором результаты и их анализ соответствует паспорту специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств». Диссертационная работа удовлетворяет требованиям п.п. 9-14 Положения о порядке присуждения учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 14.09.2013 года №842, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Диссертационная работа была заслушана и обсуждена на заседании Ученого совета федерального государственного автономного научного учреждения Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) 2024 года (протокол № 3 от 14 марта 2024 г.).

**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](mailto:isvch@isvch.ru)

Сайт: <https://new.isvch.ru>

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



Д.С. Пономарев