

Козловский Эдуард Юрьевич

**МАЛОШУМЯЩИЙ ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВЕ
ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ (Al, In)GaAs/GaAs**

Специальность: 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого», кафедра физики твердого тела и микроэлектроники (ФТТМ).

Научный руководитель:

Селезнев Борис Иванович

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», директор Института электронных и информационных систем, заведующий кафедрой физики твердого тела и микроэлектроники

Официальные оппоненты:

Зубков Василий Иванович

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», профессор кафедры микро- и нанoeлектроники

Александров Сергей Борисович

кандидат технических наук, заместитель генерального директора ЗАО «ЭлТех СПб»

Ведущая организация: **ОАО «Концерн «Радиотехнические и информационные системы»**

Защита состоится "5" декабря 2013 года в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу:

197376, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан «1» ноября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.238.04

доктор физико-математических наук,

профессор

Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Развитие современной твердотельной СВЧ электроники в значительной степени определяется успехами, достигнутыми в области материаловедения сложных полупроводниковых соединений и структур на их основе. При этом наиболее широкое распространение и практическое применение в сфере серийного производства малошумящих приборов микро- и наноэлектроники остается за арсенидом галлия и гетероструктурами (Al, In)GaAs/GaAs на его основе. Транзисторы, изготавливаемые на таких структурах, и сами структуры, получили название **HEMT**. Совершенствование технологий эпитаксиального роста сделало возможным появление более сложных композиций гетероструктур: **pHEMT** и **mHEMT**.

Базовая технология изготовления малошумящих транзисторов на GaAs с учетом особенностей транспорта электронов в гетероструктурах (Al, In)GaAs/GaAs позволяет получать малошумящие транзисторы и СВЧ МИС на их основе со значительно лучшими характеристиками в широком частотном диапазоне, по сравнению с аналогичными приборами, изготовленными на гомоэпитаксиальных или ионнолегированных структурах GaAs. Использование pHEMT структур позволяет создавать малошумящие транзисторы с минимальным коэффициентом шума не более 0,4 дБ и 1,0 дБ на частотах 12 ГГц и 30 ГГц соответственно.

В настоящей работе, посвященной исследованию возможных путей решения ряда актуальных проблем технологии изготовления малошумящих транзисторов на основе pHEMT структур, проведен анализ влияния качества исходного материала и отдельных этапов формирования транзисторной структуры на параметры конечного прибора. Проведенные исследования позволяют создавать малошумящие транзисторы с заданными параметрами на гетероструктурах, отобранных в соответствии с требованием достижения на них наилучших параметров прибора. Применение результатов исследования позволяет создать pHEMT транзистор с минимальным коэффициентом шума не более 1,5 дБ и максимальным коэффициентом усиления 10 дБ на частоте 30 ГГц. Максимальная величина удельной крутизны составляет 400 мА/(В·мм). Актуальность достигнутых результатов подтверждается их использованием при разработке и изготовлении полевых транзисторов и модулей СВЧ, серийно изготавливаемых на предприятии ЗАО «НПП «Планета-Аргалл», а также применением серийной продукции предприятия в составе собственных изделий сторонними организациями, занимающимися разработкой и изготовлением радиоэлектронной аппаратуры СВЧ диапазона (ЗАО «НПП «Салют-27», г. Нижний Новгород; ОАО «УПКБ «Деталь», г. Каменск-Уральский; ОАО «НПО НИИИП-НЗиК», г. Новосибирск; ОАО «НПО «ЛЭМЗ», г. Москва и др.).

Целью работы является выявление доминирующих факторов в технологии изготовления рНЕМТ на гетероструктурах (Al, In)GaAs/GaAs, определяющих параметры транзисторов и разработка маршрута их изготовления с последующим построением линейных и нелинейных моделей активного элемента с возможностью их дальнейшего использования при разработке СВЧ устройств на основе рНЕМТ транзисторов.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

- исследование конструктивных особенностей гетероструктур на GaAs, сравнительный анализ их параметров и рассмотрение физических принципов работы полевого транзистора с барьером Шоттки на рНЕМТ структурах;
- анализ методов диагностики гетероструктур: разрушающие и неразрушающие средства контроля параметров;
- разработка технической методики по исследованию параметров двумерного электронного газа (ДЭГ) в структурах GaAs/Al_xGa_{1-x}As/GaAs;
- построение профилей распределения тока по глубине гетероструктуры в процессе травления рНЕМТ с различными параметрами ДЭГ и установление соответствия отдельных участков профиля с реальными слоями полупроводниковой гетероструктуры;
- установление требований к исходным гетероструктурам, а именно: к концентрации и подвижности электронов в ДЭГ, обеспечивающим достижение наилучших статических и динамических характеристик транзисторов;
- исследование влияния глубины травления на этапе формирования углубления под затвор на параметры транзистора, в первую очередь на напряжение отсечки и крутизну вольтамперной характеристики, выступающей, как правило, в качестве основного критерия при отборе кристаллов транзисторов для использования в составе СВЧ усилительных модулей;
- разработка маршрута изготовления рНЕМТ транзистора и исследование статических, динамических и СВЧ характеристик экспериментальных образцов транзисторов;
- построение линейных и нелинейных моделей рНЕМТ транзисторов и апробация полученных результатов при разработке модулей СВЧ.

Научная новизна представляемых в работе результатов заключается в следующем:

1. Предложена комплексная методика по определению параметров ДЭГ и конфигурации слоев в гетероструктурах типа GaAs/Al_xGa_{1-x}As/GaAs с использованием селективного травления, а также холловских и эллипсометрических измерений.
2. Установлена связь параметров ДЭГ и качества гетероструктур, характеризуемого профилями распределения тока по глубине гетероструктуры в процессе травления, с

параметрами конечного прибора и выработаны критерии по отбору исходных структур на их основе.

3. Выявлено существенное влияние глубины травления на этапе формирования углубления под затвор на крутизну вольтамперной характеристики (ВАХ) и напряжение отсечки готового транзистора. Этот фактор позволяет управлять величинами данных параметров на этапе изготовления транзисторов и может быть использован при создании приборов с заданными характеристиками.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Комплексная методика селективного послойного травления структуры GaAs/Al_xGa_{1-x}As/GaAs с применением холловских и эллипсометрических измерений позволяет определить параметры двумерного электронного газа и установить состав слоя Al_xGa_{1-x}As.

2. Профили распределения тока по глубине гетероструктуры в процессе травления могут выступать в качестве критерия качества исходных структур и использоваться при отборе пластин для изготовления приборов. Максимальное значение крутизны ВАХ достигается для структур, на профиле которых в явном виде присутствует пологий участок с практически полным отсутствием изменения тока на протяжении нескольких итераций травления.

3. Прецизионное управление режимами корректировок токов при формировании углубления под затвор позволяет получать транзисторы с заданными параметрами (напряжение отсечки и крутизна ВАХ транзистора) в широком диапазоне значений без изменения конструкции рНЕМТ.

4. Измеренные S-параметры и нелинейные вольтамперные характеристики активного элемента в совокупности с применением САПР позволяют реализовать алгоритм для экстракции параметров линейной и нелинейной моделей рНЕМТ транзистора с уточненными параметрами шумовой модели, которые адекватно описывают СВЧ характеристики прибора и могут быть использованы при разработке СВЧ МИС в широком частотном диапазоне.

Практическая значимость работы:

1. Проведенные в рамках данной работы исследования позволяют установить связь между параметрами готового прибора и характеристиками исходных полупроводниковых структур. Данный факт является важным на этапе взаимодействия предприятия-разработчика конечных изделий и специалистов в области полупроводникового роста, обеспечивающих разработчика исходным материалом на основе выработанных им требований к параметрам структур. Оценка качества гетероструктур по профилям распределения тока по глубине гетероструктуры в процессе травления может проводиться на контрольных образцах до запуска рабочих партий, позволяя тем самым исключить материальные и временные затраты

на запуск исходного материала, не обеспечивающего требуемых параметров конечных изделий.

2. Исследование влияния профилей распределения тока по глубине гетероструктуры в процессе травления и величины углубления затвора на параметры транзистора позволяет получать приборы с заданным напряжением отсечки и крутизной ВАХ. Данный факт является крайне важным, поскольку позволяет даже для одной конструкции рНЕМТ получать транзисторы с предсказуемыми и значимо отличными параметрами. Это важно при использовании транзисторов в составе усилительных модулей различного частотного диапазона и с существенно различными требованиями по коэффициенту шума, коэффициенту усиления по мощности, току потребления и выходной мощности. Кроме того, возможность получать на одной пластине приборы нормально закрытого и нормально открытого типа является актуальной в части реализации цифровых схем и таких устройств, как драйвер управления, широко используемый в составе СВЧ МИС (коммутаторы, аттенюаторы, фазовращатели).

3. Результаты проведенных исследований включены в базовый маршрут изготовления рНЕМТ транзисторов и используются при изготовлении серийно выпускаемых транзисторов и модулей СВЧ диапазона.

4. Разработанные по результатам диссертационной работы транзисторы, а также их линейные и нелинейные модели нашли применение при проектировании и изготовлении в настоящий момент уже серийных изделий (ЗП397, ЗП398, М421301, М52125, М44228, М44229), выпускаемых предприятием ЗАО «НПП «Планета-Аргалл» и применяемых в составе собственных изделий сторонними организациями, занимающимися разработкой и изготовлением радиоэлектронной аппаратуры СВЧ диапазона.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах и школах: 18-ая Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 8-12 сентября 2008 г., Севастополь, Крым, Украина; 6 -ой Международный семинар «Карбид кремния и родственные материалы» (ISSCRM - 2009), 27-30 мая 2009 г., Великий Новгород, Россия; 3-я Научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ электроники «Мокеровские чтения», 23-24 мая 2013 г, Москва, Россия.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов подтверждается:

- самим фактом реализации малощумящего полевого транзистора на рНЕМТ структурах с характеристиками на уровне мировых аналогов;
- использованием достигнутых результатов в части прогнозирования параметров транзистора и современных средств расчета схем (САПР) для разработки СВЧ устройств

и хорошим совпадением характеристик экспериментальных образцов и результатов моделирования;

- соответствием результатов анализа данных, полученных в работе, с имеющимися в литературе (когда такое сравнение возможно).

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 работа, из них 8 в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК, 12 публикаций в трудах научно-технических конференций и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации: Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 107 наименований. Основная часть работы изложена на 167 страницах машинописного текста. Работа содержит 52 рисунка и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследований, сформулированы научная новизна, практическая значимость полученных результатов и научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору литературных данных по гетероструктурам на арсениде галлия, их конструкциям и электрофизическим параметрам носителей заряда в ДЭГ, а также рассмотрены методы диагностики гетероструктур, используемые в технологии ростовых процессов и при входном контроле на предприятиях-потребителях. Также в данной главе приводится краткое описание основных современных тенденций, реализуемых в технологии изготовления малошумящего рНЕМТ транзистора и МИС на его основе.

В первом и втором разделах приводятся описания конструкций гетероструктур на арсениде галлия, используемых в технологии производства СВЧ полевых транзисторов с барьером Шоттки.

Конструкционные отличия слоевого состава определяют электрофизические параметры ДЭГ.

В настоящее время наибольшее распространение в технологии производства СВЧ МИС и полевых транзисторов получили структуры типа **рНЕМТ**. Широкий интерес представляют исследования влияния конструкции **рНЕМТ** структур на параметры изготавливаемых на их основе СВЧ МИС и полевых транзисторов с барьером Шоттки.

При отработке технологии эпитаксиального роста, а также при отборе полупроводниковых гетероструктур для производства очень остро стоит задача контроля параметров исходного материала. Методам диагностики гетероструктур посвящена третья часть обзора.

На этапе разработки конструкции гетероструктуры и при внедрении ее в технологию производства изделий СВЧ объективно возникает необходимость в характеристике

структуры и оценке ее качества. Применительно к гетероструктурам рНЕМТ традиционно основными параметрами, используемыми для оценки их качества, являются концентрация (n_s) и подвижность (μ_s) носителей заряда в ДЭГ.

В части характеризации гетероструктуры применительно к реализации отдельных технологических операций и сравнению по параметрам готовых приборов для технолога важна информация о параметрах контактного слоя (толщина и слоевое сопротивление), а также толщина активной области (суммарная толщина барьерного и донорного слоев) и уровень легирования донорного слоя.

Наиболее гибким инструментом, позволяющим реализовать подобную характеризацию исходной гетероструктуры, выступают методы холловских и эллипсометрических измерений, описанию физических принципов которых и уделено наибольшее внимание в третьем разделе.

Четвертый раздел посвящен технологии изготовления МИС СВЧ диапазона. В данном разделе подробно рассмотрены основные тенденции и приемы, используемые при изготовлении рНЕМТ транзистора.

В технологии изготовления рНЕМТ транзистора следует отдельно выделить следующие технологические этапы: 1) формирование омического контакта; 2) формирование изоляции элементов МИС или дискретных кристаллов транзисторов; 3) формирование субмикронного затвора; 4) формирование углубления под затвор.

Данные технологические этапы, безусловно, составляют лишь часть от полного маршрута изготовления рНЕМТ транзистора, однако именно на данных этапах осуществляются наиболее сильные воздействия на гетероструктуру, приводящие как к изменению конструкции транзистора, так и к изменению характеристик готового прибора.

В литературном обзоре представлено современное состояние технологии приборных элементов маломощных полевых транзисторов. Обосновывается актуальность исследования влияния режимов проведения отдельных технологических операций на конструкцию и приборные характеристики маломощных полевых транзисторов.

На основании обобщения результатов приведенного анализа и выводов формулируется цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена методам диагностики в технологии изготовления рНЕМТ и СВЧ МИС на их основе. В данной главе представлены результаты диагностики как исходной гетероструктуры, так и приборных элементов, формируемых в процессе изготовления транзистора рНЕМТ.

Первый раздел главы посвящен описанию технической методики по исследованию параметров ДЭГ в гетероструктурах GaAs/Al_xGa_{1-x}As/GaAs.

В основу методики положено комплексное использование пошагового травления гетероструктуры с параллельно выполняемыми холловскими и эллипсометрическими измерениями.

В качестве базового метода измерения удельного сопротивления и коэффициента Холла выбрана модификация метода Ван-дер-Пау для контроля образцов произвольной формы при планарном размещении зондов.

Эллипсометрические измерения выполнялись на одной длине волны 632,8 нм (гелиево-неоновый лазер) на базе промышленного эллипсометра ЛЭМ-2М, принцип работы которого основан на нулевой схеме измерения.

Послойное травление гетероструктуры проводилось в несколько этапов с применением различных методик травления: анодное окисление с последующим травлением пленки в HCl, химическое травление в растворе KOH и в перекисно-аммиачном растворе.

В результате апробации комплексной диагностики с использованием селективного травления, холловских и эллипсометрических измерений на образцах с эпитаксиальной структурой типа n^+ -GaAs/n-AlGaAs/i-AlGaAs/i-GaAs были получены следующие результаты:

- концентрация носителей заряда в ДЭГ $(0,6-0,7) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при $T=300 \text{ К}$;
- подвижность носителей заряда в ДЭГ $(5100-5800) \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $T=300 \text{ К}$;
- толщина контактного слоя n^+ -GaAs составляет 80 нм;
- состав твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ $x=0,25$; толщина слоя – 40 нм. Концентрация легирующей примеси в слое AlGaAs составляет величину $N \approx 1,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Второй раздел посвящен применению методов атомно-силовой микроскопии для исследования изменений в морфологии поверхностей транзисторной структуры (полупроводника и металлизации) после технологических обработок. В этом же разделе представлены результаты количественной оценки геометрических характеристик активной области транзистора.

В третьем разделе представлены результаты диагностики рНЕМТ транзистора с использованием электронно-ионного (двухлучевого) растрового электронного микроскопа. С применением данного инструмента на исследованном образце было выполнено локальное ионное травление фрагмента затвора, что позволило получить изображение формы и геометрии затвора в поперечном сечении, а также выполнить количественную оценку элементов конструкции затвора. Полученные данные хорошо коррелируют с аналогичными данными, полученными средствами атомно-силовой микроскопии, а также в результате теоретической оценки отдельных геометрических размеров.

Четвертый раздел посвящен описанию результатов диагностики тонких диэлектрических пленок с использованием ИК-спектроскопии, а также выработке

требований к диэлектрику и конструкции металлизации обкладок тонкопленочного конденсатора, используемого в технологии СВЧ МИС.

Использование современного оборудования, выбор наиболее важных элементов конструкции рНЕМТ транзистора и СВЧ МИС в совокупности с подготовкой соответствующих образцов для исследования позволяют получить качественную и количественную информацию, как о конструкции приборных структур, так и об особенностях отдельных технологических процессов.

Третья глава посвящена исследованию профилей распределения тока по глубине структуры в процессе травления гетероструктур (Al, In)GaAs/GaAs с различными параметрами ДЭГ, а также исследованию статических и динамических характеристик полевых транзисторов, изготовленных на этих структурах.

Конфигурация гетероструктуры представлена в таблице 1.

На рисунке 1 представлен типовой профиль распределения тока по глубине гетероструктуры в процессе ее травления. Профиль представляет собой зависимость тока, протекающего через тестовый элемент, от времени травления.

Таблица 1

Слой транзисторной гетероструктуры, назначение	Состав x_{AlAs}, y_{InAs}	Толщина	Уровень легирования N_{Si} , $см^{-3}$
Полуизолирующая подложка GaAs		~420 мкм	
Буферный слой GaAs		200 нм	н/л
Сверхрешётка $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ ($\times 7$)	0.23/0.0	2 нм/2 нм	н/л
Буферный слой GaAs		300 нм	н/л
Канал $In_yGa_{1-y}As$	0.16-0.17	12 нм	н/л
Сглаживающий слой GaAs		1.5 нм	н/л
Спейсер $Al_xGa_{1-x}As$	0.23	2 нм	н/л
Сильнолегированный n^+ - $Al_xGa_{1-x}As$	0.23	13 нм	$\sim 2.5 \times 10^{18}$
Барьерный слой n - $Al_xGa_{1-x}As$	0.23	25 нм	$\sim 2.5 \times 10^{18} - 5 \times 10^{16}$
Барьерный слой n -GaAs		15 нм	5×10^{16}
Контактный слой n -GaAs		20 нм	$5 \times 10^{16} - 3 \times 10^{18}$
Контактный слой n^+ -GaAs		50 нм	$(3-5) \times 10^{18}$

Тестовый элемент конструктивно представляет собой структуру сток-исток транзистора с расстоянием 3 мкм между омическими контактами. Геометрия области, подвергаемой травлению, составляет 1,4 x 75 мкм (по фотошаблону).

Выбор конструкции и топологии тестового элемента обусловлен необходимостью привязки проводимых исследований к реальной технологии и конструкции активного элемента с целью распространения и использования полученных результатов в технологии изготовления рНЕМТ транзистора.

Профили распределения тока по глубине гетероструктуры в процессе ее травления, получаемые на пластинах из одного ростового процесса (в рамках данного исследования),

имеют аналогичный характер с типовым характером изменения тока, представленным на рисунке 1, как в качественном, так и количественном отношении.

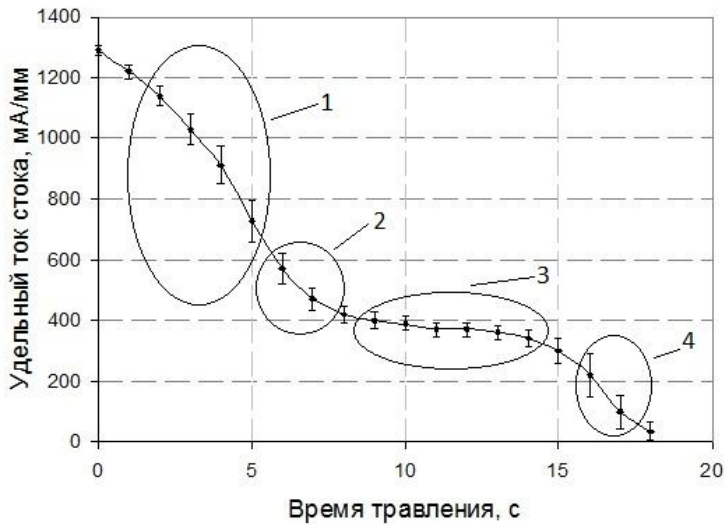


Рисунок 1 – Типовой профиль распределения тока по глубине гетероструктуры в процессе ее травления

паспортным данным на структуры), физических основах формирования ДЭГ и локализации подвижных носителей заряда и принимая во внимание полученный экспериментальный профиль распределения тока по глубине гетероструктуры в процессе ее травления, можно на кривой травления выделить четыре четко выраженных участка и связать их со следующими слоями структуры: 1 – травление контактного слоя n^+ -GaAs и n-GaAs; 2 – травление барьерного слоя n-GaAs и n-AlGaAs; 3 – травление сильнолегированного n^+ -AlGaAs (обедненного подвижными носителями заряда); 4 – травление канала InGaAs.

Среди исследованных структур были отдельные пластины, для которых профиль распределения тока по глубине гетероструктуры в процессе ее травления отличался от типового и практически не имел пологого участка 3, представленного на рисунке 1. Сравнение двух профилей представлено на рисунке 2.

Выявленные отличия профилей связываются с качеством структур, а именно с характером локализации подвижных носителей заряда. Для структур с профилем 1 характерно формирование ДЭГ с практически полной локализацией всех электронов в квантовой яме в нелегированном InGaAs. Для структур с профилем 2 не выполняется условие полной локализации электронов в квантовой яме, и определенная часть подвижных носителей заряда оказывается “размытой” по слою AlGaAs, вследствие чего при травлении этого слоя наблюдается плавное изменение тока стока и отсутствие участка насыщения.

Для пластин с гетероструктурами, выращенными в другом ростовом процессе, качественный характер профиля сохраняется. Величина уровней токов может отличаться в пределах изменений, обусловленных точностью воспроизведения уровней легирования областей n^+ -GaAs и n^+ -AlGaAs, а также параметров ДЭГ.

Основываясь на данных о конфигурации структуры (по

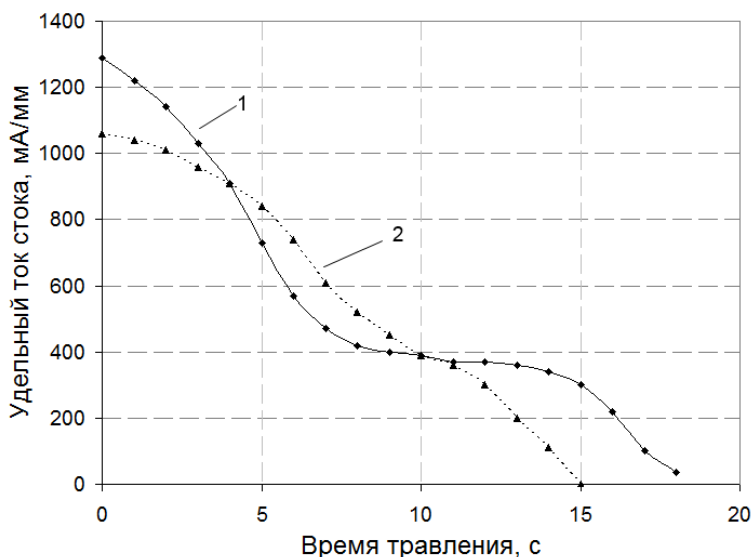


Рисунок 2 – Вариации профилей распределения тока по глубине гетероструктуры в процессе ее травления

зависимости были опробованы структуры рНЕМТ (таблица 1) с различными параметрами ДЭГ. На пластинах были изготовлены транзисторы по технологии рНЕМТ и выполнены измерения параметров полученных транзисторов.

Обобщая результаты по параметрам ДЭГ исходных структур, статическим, динамическим и СВЧ характеристикам транзисторов, изготовленных на их основе, а также, учитывая особенности проведения ряда технологических операций (в первую очередь касающихся формирования затвора), были установлены требования к параметрам ДЭГ, наилучшим образом обеспечивающим параметры готового прибора: $n_s > 1.9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $\mu_s > 5800 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при 300 К. При этом важно отметить, что влияние концентрации носителей в ДЭГ n_s на усилительные свойства транзистора является более значимым, чем их подвижность в слабых электрических полях μ_s .

В заключительной части главы приводится исследование влияния операции углубления под затвор на параметры транзистора.

Для структур с оптимальными параметрами ДЭГ была установлена связь между величиной углубления затвора (участок кривой на рисунке 1) и характеристиками прибора. В зависимости от момента остановки химического травления при формировании углубления затвора на одной и той же структуре (таблица 1) могут быть получены транзисторы со следующими параметрами (таблица 2).

При изготовлении малошумящих транзисторов на первое место выступает достижение минимального коэффициента шума при сохранении высокого коэффициента усиления. Необходимым условием достижения этих параметров является получение максимально возможной крутизны ВАХ в рабочей точке прибора.

Уменьшение крутизны для транзисторов, изготовленных на таких структурах, по сравнению со структурами с профилем 1, составляет до 40-50%.

Одной из задач исследования было выявление влияния параметров ДЭГ: концентрации носителей заряда n_s и их подвижности μ_s на параметры транзисторов, получаемых на этих структурах.

С целью установления такой

Таблица 2

Участок кривой на рисунке 1	$U_{отс}, В$ ($U_{си}=3 В,$ $I_c=1 мА$)	$I_{с нач},$ мА/мм ($U_{зи}=0 В,$ $U_{си}=3 В$)	$S_{макс},$ мА/(В·мм)
1	$\geq 2,0$	350-450	160
2	0,8-2,0	250-350	350
3	0,4-0,8	150-250	300
4	$\leq 0,4$	≤ 150	160

Для исследованной конструкции гетероструктуры такое требование реализуется при напряжении отсечки в диапазоне (0,8-1,2) В. Таким образом, наиболее соответствующие требованиям малощумящего

режима работы транзисторы получают при остановке травления на операции углубления под затвор на переходном участке 2-3 в соответствии с рисунком 1.

Выбор момента остановки травления, а соответственно и комплекс получаемых статических и динамических параметров определяется функциональным назначением устройства.

Четвертая глава посвящена описанию маршрута изготовления малощумящего рНЕМТ и выявлению основных технологических факторов, наиболее существенно влияющих на параметры готового прибора.

В рамках данной работы более детально были рассмотрены такие этапы маршрута изготовления, как формирование омического контакта (ОК) и межприборной изоляции, а также формирование субмикронного затвора.

Для формирования омического контакта используется метод взрывной литографии с последующим вжиганием. По итогам всего комплекса работ над выбором системы металлизации и процессом вжигания была выбрана следующая конструкция металлизации омического контакта и режимы его вжигания: Au-Ge-Ni-Au (60-30-18-20 нм), $T=475^{\circ}C$, $t=90-100$ секунд. Выбранная конструкция ОК и режимы вжигания позволяют исключить появление выплывов ОК на структурах рНЕМТ и обеспечивают минимальную шероховатость поверхности при сопротивлении ОК на уровне $(1,5-2,5) \cdot 10^{-6}$ Ом·см² и неоднородность по площади не более 20-30%.

Межприборная изоляция выполняется в два этапа: на первом этапе – мезатравление на толщину всех активных слоев в перекисно-аммиачном растворе (ПАР), на втором этапе – ионное легирование ионами бора (B^+). Наилучшие результаты, как по величине остаточных токов утечки по изоляции, так и по минимальному рельефу ступенек травления, а также отсутствие эффекта прыжковой проводимости были получены при использовании мезатравления в ПАР (1:1:160) в течение 40 сек с последующей ионной имплантацией B^+ с дозой 0,3 мкКл/см² и энергией 125 кэВ.

Основным конструктивным параметром малощумящего транзистора рНЕМТ, необходимым для достижения высоких СВЧ характеристик является длина затвора.

Субмикронный размер длины затвора (на уровне $L=(0,25\div 0,35)$ мкм) обеспечивается путем реализации технологии заужения “щели” в диэлектрике. Для этого выбрана система из двух слоев диэлектрика SiO_2 . Формирование длины затвора 0,25-0,35 мкм обеспечивается использованием толщин диэлектриков 0,8-0,9 мкм при размере “щели” в первом диэлектрике 0,8-1,0 мкм.

Выбор исходного материала, отвечающего поставленным задачам, соблюдение технологических режимов, а также учет особенностей изготовления малошумящего транзистора рНЕМТ позволяют реализовать на структурах $(\text{Al}, \text{In})\text{GaAs}$ рНЕМТ транзисторы и МИС, работающие в миллиметровом диапазоне длин волн.

В пятой главе приводятся основные результаты измерений приборных характеристик созданных малошумящих полевых транзисторов. Рассматриваются особенности построения линейной (малосигнальной) FETN и нелинейной ТОМ 2 моделей СВЧ малошумящего рНЕМТ транзистора с применением САПР Microwave Office (MWO), а так же соотнесение результатов расчета и эксперимента.

В рамках данной работы в качестве объекта исследования выступал малошумящий рНЕМТ транзистор с шириной затвора $W=160$ мкм, изготовленный по технологии, описанной в главе 4. Алгоритм построения моделей транзистора включал в себя несколько этапов: 1) Измерение выходных $I_c=f(U_{си}, U_{зи})$ и барьерных $I_z=f(U_{зи}), I_z=f(U_{з-си})$ характеристик транзистора; 2) Измерение S-параметров кристалла транзистора в различных режимах работы ($U_{си}, I_c$) в частотном диапазоне 1-40 ГГц; 3) Экстракция параметров моделей с применением САПР MWO.

Использование предложенного алгоритма позволило построить нелинейную модель транзистора, обеспечивающую хорошее совпадение результатов измерений и моделирования, что свидетельствует о корректности восстановленных значений параметров модели и возможности ее использования при необходимости задания различных режимов работы транзистора по постоянному току.

Для экстракции шумовых параметров моделей, а также для апробации полученных результатов, на базе полученных моделей ТОМ 2 и FETN, был разработан однокаскадный МШУ для диапазона частот 8-10 ГГц. Измерение СВЧ характеристик модуля МШУ выполнялось с использованием измерителя модуля коэффициента передачи и отражения P2M-18 (0,01-18 ГГц) и измерителя коэффициента шума X5M-18 (0,01-18 ГГц).

Проведенные исследования указывают на возможность использования предложенного алгоритма для экстракции параметров линейной и нелинейной моделей рНЕМТ транзистора. Апробация восстановленных моделей на примере построения МШУ СВЧ диапазона показывает достаточно высокую точность полученных моделей при описании СВЧ характеристик усилителя.

Проведенные в рамках данной работы исследования были применены на предприятии ЗАО “НПП ”Планета-Аргалл” для разработки серии малошумящих транзисторов в диапазоне частот до 30 ГГц.

Технология рНЕМТ используется на предприятии при изготовлении транзисторов с различной шириной затвора и топологией контактных площадок для дальнейшего применения в составе гибридных интегральных схем малошумящих усилителей.

Примером практической реализации проведенных исследований выступает разработанный и изготовленный по технологии 0,25 мкм GaAs рНЕМТ МИС СВЧ МШУ с диапазоном рабочих частот $3 \div 5$ ГГц. Измерение СВЧ характеристик МИС МШУ выполнялось на пластине с использованием зондовой измерительной платформы Cascade Microtech M150 и векторного анализатора электрических цепей R&S ZVA40 (0,01-40 ГГц).

Рассмотренная технология изготовления СВЧ МИС МШУ с учетом особенностей изготовления активных и пассивных элементов схемы позволяет реализовать усилители, работающие в диапазоне частот до 40 ГГц.

В **заключении** приведены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена техническая методика по диагностике гетероструктур GaAs/AlGaAs/GaAs с использованием методов травления, холловских и эллипсометрических измерений. Проведена апробация этой методики и продемонстрирована возможность определения параметров ДЭГ (концентрации свободных носителей заряда и их подвижности) и слоевой конфигурации гетероструктуры, а также установление состава твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$. В результате апробации на экспериментальных структурах получены параметры: $n_s=(0,6-0,7) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $\mu_s=(5100-5800) \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $T=300 \text{ К}$. Состав твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$ $x=0,25$ и толщина – 40 нм. Концентрация легирующей примеси в слое AlGaAs составляет величину $N \approx 1,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.
2. Исследованы рНЕМТ структуры с различными параметрами ДЭГ и установлены требования к ним с целью достижения максимальной крутизны ВАХ на транзисторных структурах. Наилучшие результаты по крутизне (до 350 мА/(В·мм)) достигнуты на структурах с параметрами $n_s > 1,9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $\mu_s > 5800 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при 300 К. Установлены требования к профилю распределения тока по глубине гетероструктуры в процессе ее травления, обеспечивающие достижение наилучших статических и СВЧ характеристик готового прибора.
3. Установлена связь между величиной углубления затвора на этапе корректировки тока и величиной крутизны, напряжения отсечки и начального тока стока транзистора. Определен участок профиля распределения тока по глубине гетероструктуры в процессе ее травления, при остановке на котором во время проведения второй корректировки

получаются транзисторы с максимальной крутизной ВАХ (до 350 мА/(В·мм)). Получаемые напряжения отсечки составляют (0,8-1,2) В.

4. Разработана и внедрена технология рНЕМТ, позволяющая изготавливать сверхмалозумящие полевые транзисторы, отвечающие всем требованиям надежности, предъявляемым к изделиям, применяющимся в составе изделий ВВТ. На основе разработанной технологии получены транзисторы, имеющие минимальный коэффициент шума не более 1,5 дБ на частоте 30 ГГц при максимальном коэффициенте усиления не менее 9,3 дБ.
5. Восстановлены по измеренным статическим характеристикам и измеренным S-параметрам линейные и нелинейные модели рНЕМТ транзисторов, выполнена оптимизация параметров моделей на получение максимального соответствия результатов моделирования с экспериментальными данными. По результатам оптимизации построена библиотека моделей рНЕМТ транзисторов с различной шириной затвора.
6. На основе полученных моделей рНЕМТ транзисторов выполнена их апробация путем разработки, изготовления и измерения параметров МШУ СВЧ диапазона.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1 Осипов, А.М. Формирование диодных структур с барьером Шоттки на арсениде галлия / А.М. Осипов, Э.Ю. Козловский, Б.И. Селезнев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – Серия: Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2008. – № 6. – С. 187-190.

2 Козловский, Э.Ю. Транзисторные структуры типа рНЕМТ: исследование особенностей полупроводниковой гетероструктуры методами атомно-силовой микроскопии / Э.Ю. Козловский, Ю.М. Спивак, В.А. Мошников, А.А. Пономарева, Б.И. Селезнев, Н.Н. Иванов, А.В. Желаннов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – Серия: Физико-математические науки. – 2010. – № 1. – С.18 – 28.

3 Козловский, Э.Ю. Особенности технологии изготовления и оптимизация конструкции малозумящего рНЕМТ транзистора СВЧ диапазона / Э.Ю. Козловский, Б.И. Селезнев, Н.Н. Иванов // Вестник Новгородского государственного университета. – Серия: Технические науки. – 2010. – № 60. – С. 69-73.

4 Козловский, Э.Ю. Малошумящие СВЧ полевые транзисторы на арсениде галлия для систем связи / Э.Ю. Козловский, Б.И. Селезнев, В.А. Дмитриев, А.П. Штейнгарт // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – 2011. – Вып. 1, 2. – С. 82 – 87.

5 Селезнев, Б.И. Зондовые и оптические исследования микро- и наноструктур на основе арсенида галлия / Б.И. Селезнев, А.С. Ионов, А.В. Петров, Э.Ю. Козловский,

Г.О. Тимофеев // Вестник Новгородского государственного университета. – Серия: Технические науки. – 2011. – Вып. 65. – С. 31 – 36.

6 Козловский, Э.Ю. Моделирование СВЧ малошумящего рНЕМТ транзистора с применением САПР Microwave Office / Э.Ю. Козловский, Б.И. Селезнев // Вестник Новгородского государственного университета. – Серия: Технические науки. – 2012. – № 68. – С. 41-45.

7 Платонов, С.В. Малошумящие арсенид-галлиевые усилители при воздействии электромагнитных помех повышенных интенсивностей / С.В. Платонов, Н.В. Пермяков, Б.И. Селезнев, В.А. Мошников, Э.Ю. Козловский, А.М. Осипов // Вестник Новгородского государственного университета. – Серия: Технические науки. – 2012. – № 67. – С. 29-32.

8 Козловский, Э.Ю. СВЧ МИС МШУ на основе наногетероструктур GaAs рНЕМТ / Э.Ю. Козловский, А.М. Осипов, Б.И. Селезнев // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – 2013. – №1, 2. – С. 134-137.

Патенты

9 Ограничитель СВЧ-мощности: пат. №97866 / Осипов А.М., Козловский Э.Ю., Летов Р.С.; заявитель и патентообладатель ЗАО “НПП ”Планета-Аргалл”. – №2010115890 от 21.04.2010.

Прочие публикации

10 Козловский, Э.Ю. Диагностика гетероэпитаксиальных структур типа GaAs/AlGaAs/GaAs / Э.Ю. Козловский, Б.И. Селезнев // Сборник статей по материалам научной молодежной школы «Технология и дизайн микросхем». – Санкт-Петербург, 2006.

11 Козловский, Э.Ю. Диагностика эпитаксиальных и ионно-легированных структур на арсениде галлия / Э.Ю. Козловский // Сборник докладов 12-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2005». – М.: МИЭТ, 2005. – С. 72.

12 Козловский, Э.Ю. Влияние конструкции РНЕМТ на СВЧ параметры / Э.Ю. Козловский, Б.И. Селезнёв, А.П. Штейнгарт // Сборник материалов 4 Международной научно-технической конференции 25-26 мая 2006 года «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств». – В 2-х т. – Т. 1. – Новополюцк: ПГУ, 2006.– 320 с.

13 Селезнев, Б.И. Диагностика структур СВЧ полевых транзисторов на GaAs / Б.И. Селезнев, А.П. Штейнгарт, Э.Ю. Козловский // Сборник материалов 4 Международной научно-технической конференции 25-26 мая 2006 года «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств». – В 2-х т. - Т. 1. – Новополюцк: ПГУ, 2006. – 320 с.

14 Козловский, Э.Ю. Низкобарьерные диоды Шоттки на арсениде галлия / Э.Ю. Козловский, А.М. Осипов // Вестник Новгородского государственного университета. – Серия: Технические науки. – 2008. – № 46. – С.16-19.

15 Селезнев, Б.И. Технологические особенности изготовления МИС на арсениде галлия / Б.И. Селезнев, Э.Ю. Козловский, А.М. Осипов // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: сборник материалов V международной научно-технической конференции: в 3-х т. / под общ. ред. А.П. Достанко, В.А. Груздева. – Новополюцк: ПГУ, 2008. – С. 54-57.

16 Осипов, А.М. СВЧ монолитные интегральные схемы на основе р-НЕМТ структур / А.М. Осипов, Б.И. Селезнев, Э.Ю. Козловский // Сборник материалов 6-го международного семинара «Карбид кремния и родственные материалы». – В. Новгород, 2009. – С. 218-219.

17 Козловский, Э.Ю. СВЧ микроприборы на основе рНЕМТ наногетероструктур / Э.Ю. Козловский, Б.И. Селезнев // Материалы Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике», Нальчик: КБГУ, 2009. – С. 164-166.

18 Козловский, Э.Ю. Технология СВЧ микроприборов на основе рНЕМТ наногетероструктур / Э.Ю. Козловский, Б.И. Селезнев // Сборник конкурсных научных работ аспирантов и молодых ученых по направлению «Стратегическое партнерство вузов и предприятий радиоэлектронной промышленности». – Санкт-Петербург, 2009. – С.14-19.

19 Платонов, С.В. Малошумящий усилитель с защитой входных каскадов на арсениде галлия / С.В. Платонов, А.М. Осипов, Э.Ю. Козловский, Б.И. Селезнев // Материалы III Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике». – Нальчик: КБГУ, 2010. – С. 260-265.

20 Козловский, Э.Ю. Технология изготовления и моделирование СВЧ малошумящего транзистора на основе рНЕМТ наногетероструктур / Э.Ю. Козловский, Б.И. Селезнев // Вестник СПбО АИН. – 2010. – Вып. № 7. – С.35 – 45.

21 Platonov, S.V. Power Limiter/Low-Noise Amplifier of C-band / S.V. Platonov, A.M. Osipov, E.Y. Kozlovsky (МШУ С-диапазона с ограничением СВЧ мощности на входе) // 11th International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM' 2010: Алтай – 2010. - P. 193-196.