

На правах рукописи

Калинин Борис Вячеславович

**РАЗРАБОТКА МОЩНОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА  
С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ  
НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР (Al,Ga)N/GaN**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор  
Пихтин Александр Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Селезнев Борис Иванович, Институт электронных и информационных систем, ректор;

кандидат физико-математических наук Александров Сергей Борисович,  
ЗАО «Элтех-СПб», заместитель генерального директора

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «ОКБ-Планета»

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
совета по защите докторских  
и кандидатских диссертаций,  
д. ф. - м. н., профессор

Мошников В. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В последние тридцать лет для создания СВЧ-усилителей мощности в основном используются арсенид галлия и гетероструктуры на его основе. Недавние исследования выявили ряд новых широкозонных материалов, которые превосходят традиционные полупроводники по основным характеристикам. Использование таких материалов позволяет создавать монолитные и гибридно-монолитные схемы с высокими плотностями мощности и к. п. д. до 70 %. В настоящее время быстро развивается технология производства активных элементов на основе гетероструктур  $(Al,Ga)N/GaN$ . Их применение позволит улучшить существующие СВЧ-системы сразу по нескольким параметрам. Например, в усилительных трактах приёмо-передающих модулей активных фазированных антенных решёток станет возможным увеличить удельную мощность антенны, уменьшить массогабаритные характеристики, существенно упростить системы охлаждения. Последнее преимущество связано с тем, что транзисторы на этих гетероструктурах могут обеспечивать требуемые характеристики вплоть до температур  $\sim 600$  °С. Кроме того, приборы, использующие гетероструктуры  $(Al,Ga)N/GaN$ , устойчивы к воздействию радиации, что даёт им преимущества в военной и космической отраслях. Возможно использование таких гетероструктур для изготовления не только мощных, но и малошумящих усилителей, выдерживающих сигналы высокой мощности, попадающие на вход при отсутствии дополнительной защиты. При этом гетероструктуры  $(Al,Ga)N/GaN$  не уступают гетероструктурам  $(Al,Ga)As/GaAs$  по величине минимально достижимого коэффициента шума.

Технология изготовления транзисторных гетероструктур  $(Al,Ga)N/GaN$  появилась относительно недавно, поэтому в настоящее время ещё существуют технологические проблемы как в области гетероэпитаксии, так и в области формирования транзисторов. Это связано с тем, что к транзисторам на гетероструктурах  $(Al,Ga)N/GaN$  предъявляются несколько иные требования, чем к транзисторам на гетероструктурах  $(Al,Ga)As/GaAs$ . Кроме того, встречаются трудности при расчёте электри-

ческих схем на основе таких транзисторов, потому что становятся важны те части транзисторных характеристик, которые раньше не учитывались.

Настоящая диссертация посвящена решению проблем, возникающих в процессе изготовления и испытания транзисторов на основе гетероструктур (Al,Ga)N/GaN. В работе приведена нелинейная аналитическая модель такого транзистора, которая позволяет рассчитывать амплитудные характеристики СВЧ-усилителей мощности в режиме большого сигнала более точно, чем модели, используемые в настоящее время. Кроме того, приведены примеры расчёта двух усилителей мощности, работающих в S-, L- и C-диапазонах, с применением представленной модели. Полученные результаты будут интересны специалистам в области физики и техники полупроводников.

**Объектом исследования** в настоящей работе являлись мощные СВЧ-транзисторы с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктур (Al,Ga)N/GaN, применяющиеся в СВЧ-усилителях мощности.

**Целью диссертации** являлись разработка и исследование мощного полевого транзистора на основе гетероструктур (Al,Ga)N/GaN, а также создание математической модели, способной описать его характеристики, позволяющей увеличить точность расчёта и упростить использование таких транзисторов при создании монолитных и квазимонолитных интегральных СВЧ-усилителей мощности.

**Поставленная цель достигается при решении следующих задач:**

- исследование электрофизических и СВЧ-параметров транзисторов на основе гетероструктур (Al,Ga)N/GaN;
- определение параметров транзистора, требующих учета при разработке усилителей мощности, и разработка методики их идентификации;
- разработка аналитической модели транзистора, учитывающей такие параметры;
- встраивание разработанной модели в пакет программ для расчётов нелинейных СВЧ-цепей;
- создание методики оценки приборных и электрофизических параметров гетероструктур, а также влияния этапов постростовой обработки транзисторных нитридных гетероструктур на эти параметры;

- применение разработанных моделей при расчёте усилителя мощности;
- создание ряда широкополосных и сверхширокополосных усилителей мощности S-, L- и C-диапазонов частот с использованием транзисторов на основе гетероструктур (Al,Ga)N/GaN.

**Научная новизна** результатов работы заключается в следующем:

- исследованы вольт-амперные характеристики полевого транзистора и предложено их уточненное математическое описание в предпороговой области рабочих напряжений;
- исследованы вольт-фарадные характеристики полевого транзистора и предложено их уточненное математическое описание в предпороговой области рабочих напряжений;
- установлено, что под действием большого входного СВЧ-сигнала происходит дополнительный разогрев канала транзистора, который необходимо учитывать при расчёте усилителей мощности;
- показано, что разработанные модели позволяют более точно рассчитывать цепи согласования и режимы работы усилителей и в результате этого увеличивать их выходную мощность.

**Практическая значимость работы** определяется следующими положениями:

- разработана и реализована конструкция мощного полевого транзистора на основе ДГС (Al,Ga)N/GaN/(Al,Ga)N со следующими характеристиками: ток стока 1000 мА, пробивное напряжение «затвор – сток» 100 В, крутизна ВАХ 200 мСм/мм при длине затвора 0,5 мкм и ширине затвора 1200 мкм;
- разработана методика расчета электрофизических параметров и создана аналитическая модель полевого транзистора с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктур (Al,Ga)N/GaN;
- разработана и реализована конструкция трёх мощных полевых транзисторов на одном кристалле с шириной затворов 300, 600 и 900 мкм на основе ДГС (Al,Ga)N/GaN/(Al,Ga)N, предназначенных для создания трёх каскадных усилителей мощности;

– разработан и реализован первый отечественный СВЧ- усилитель мощности на основе гетероструктур (Al,Ga)N/GaN со следующими параметрами: рабочий диапазон частот 0,1–4 ГГц, коэффициент усиления 17–25 дБ, выходная мощность до 2 Вт;

– разработан и реализован гибридно-монокристаллический балансный СВЧ-усилитель мощности со следующими параметрами: рабочий диапазон частот 4–6 ГГц, коэффициент усиления 10 дБ, выходная мощность 12 Вт.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

- Аналитическая модель мощного субмикронного полевого транзистора, построенная на основе электрофизических параметров гетероструктуры (Al,Ga)N/GaN и геометрии транзистора, позволяет рассчитывать его вольт-амперные и вольт-фарадные, а также СВЧ-характеристики в режиме большого сигнала.

- Введение критического параметра, учитывающего разогрев затвора и канала транзистора при превышении предельных значений мощности СВЧ-сигнала, адекватно описывает эксперимент. Значение предельной мощности определяется не только физико-химическими, но и геометрическими параметрами.

- Разработанные модели, учитывающие особенности вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик гетероструктур на предпороговых участках, позволяют подобрать режим согласования СВЧ-транзистора с нагрузкой или последующим каскадом для получения максимальной мощности.

**Апробация результатов.** Основные результаты диссертационной работы апробированы на следующих конференциях:

- Седьмая всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы» (Москва, 2010);

- Третья общероссийская конференция «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных РЭС» (Омск, 2010);

- Всероссийская конференция молодых учёных «Новые материалы и нанотехнологии в электронике СВЧ» (Санкт-Петербург, 2010);

- Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Санкт-Петербург, 2011 г.).

**Достоверность и обоснованность научных положений и выводов** подтверждается:

- реализацией мощного полевого транзистора, не уступающего по своим характеристикам лучшим мировым аналогам;
- реализацией на основе такого транзистора двух усилителей мощности, не уступающих по параметрам лучшим мировым аналогам;
- использованием современных методов анализа и новейших образцов технологического и измерительного оборудования;
- соответствием практических результатов работы литературным данным.

**Публикации.** По теме диссертации получен патент на изобретение и опубликованы 5 научных работ, в том числе: 1 статья в ведущих научных изданиях, входящих в перечень ВАК, и тексты 3 докладов на международных научных конференциях и симпозиумах.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, приложения и списка литературы, включающего 135 наименований. Основной материал изложен на 104 страницах и содержит 45 рисунков и 15 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цель и задачи работы, сформулированы положения о научной новизне и практической значимости полученных результатов, а также научные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** носит обзорный характер, в ней обобщены и систематизированы литературные данные по разработке, исследованию, изготовлению и применению мощных полевых транзисторов на основе гетероструктур  $(Al,Ga)N/GaN$ . Изложены основные принципы создания мощных СВЧ-транзисторов. Обоснована актуальность применения при создании СВЧ-усилителей мощности транзисторов с двойной гетероструктурой типа  $(Al,Ga)N/GaN$ . Рассмотрены основные особенности таких гетероструктур. Продемонстрированы основные принципы моделирования транзисторов

для разработки усилителей мощности. Показано, что используемые в настоящее время модели СВЧ-транзисторов не в полной мере описывают их характеристики, поскольку при разработке СВЧ-усилителей мощности важно учитывать эффекты саморазогрева канала и затвора транзистора и их влияние на СВЧ-характеристики. Рассмотрены зависимости температуры канала транзистора от толщины и количества слоёв, формирующих чип транзистора, а также от предпороговых эффектов и топологических особенностей затвора транзистора.

На основании анализа литературы сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** проведён выбор гетероструктуры, позволяющей создавать нелинейные СВЧ-устройства с высокими плотностями мощности, и описана методика проводимых исследований. В ходе работы с применением современного технологического и измерительного оборудования исследовались электрофизические, а также линейные и нелинейные СВЧ-параметры транзисторов. В работе использовались как усовершенствованные классические методики, так и оригинальные методики оценки характеристик транзисторов, разработанные автором.

Для низкочастотных измерений применялись измеритель параметров полупроводниковых устройств HP4145B и измеритель вольт-фарадных и вольт-сименсных характеристик HP4280A, а также зондовая станция «Зонд-А5». Для измерения линейных СВЧ-характеристик в полосе частот от 500 МГц до 20 ГГц применялись векторный анализатор цепей HP8510A, источники постоянного тока HP6038A, зондовая станция Cascade Microtech M40 с копланарными СВЧ-зондами. Для измерения мощностных характеристик использовались измеритель средней мощности Agilent E4419B, специально разработанная схема включения транзистора с широкополосными цепями питания и источники постоянного тока. Топология транзистора была разработана, исходя из необходимости измерения его характеристик на СВЧ зондовой станции (рис. 1, а).



Проведено сравнение используемого транзистора с известными аналогами. Показано, что, несмотря на то, что транзистор, созданный в рамках настоящей работы не уступает зарубежным аналогам, существуют проблемы, которые ограничивают его применение, в частности, отсутствует аналитическая модель, адекватно описывающая его работу в режиме большого сигнала.

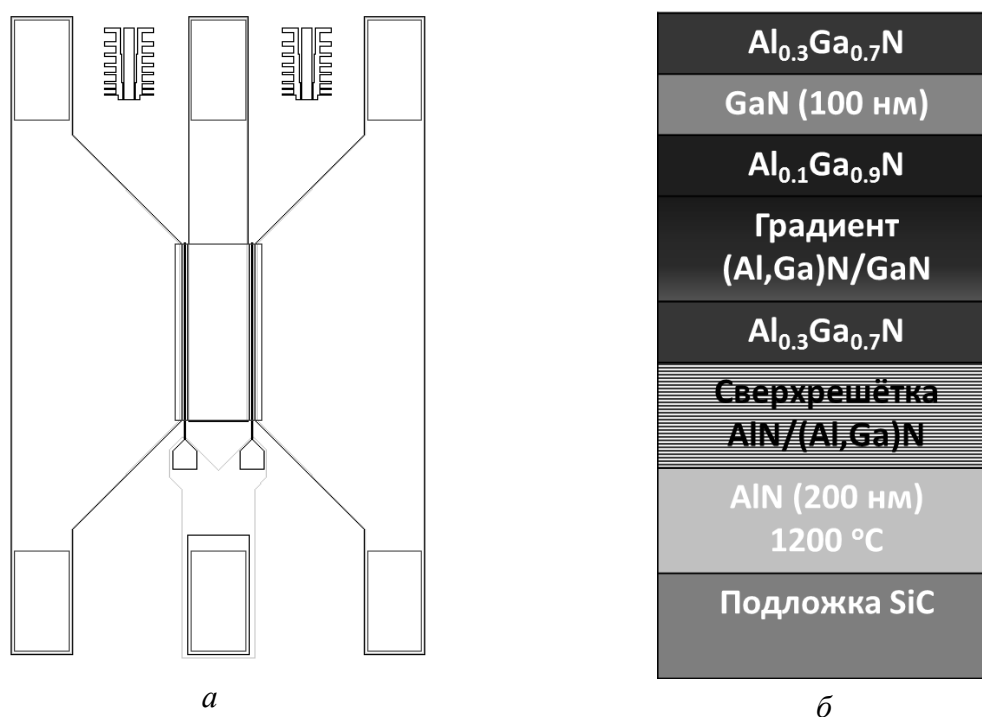


Рис. 1. Топология тестового СВЧ-транзистора (а) и расположение слоёв гетероструктуры (б)

**В третьей главе** проведён анализ известных аналитических нелинейных моделей мощных полевых транзисторов. Представлены результаты разработки аналитической модели субмикронного транзистора с высокой подвижностью электронов на гетероструктурах (Al,Ga)N/GaN. За основу была взята нелинейная модель полевого транзистора [1], [2], которая описывается эквивалентной схемой (рис. 2). Основными её элементами являются три нелинейных источника тока, управляемых напряжением ( $I_{ds}$ ,  $I_{gs}$ ,  $I_{gd}$ ), и два источника заряда, управляемых напряжением ( $C_{gd}$ ,  $C_{gs}$ ). Кроме того, в схему введён ряд элементов, уточняющих описание высокочастотных характеристик транзистора.

Экспериментальные исследования вольт-амперных характеристик транзисторов на гетероструктурах (Al,Ga)N/GaN показали значительное

падение тока стока при увеличении напряжения «сток–исток» и при напряжении на затворе, близком к нулю (рис. 3). Это может быть вызвано двумя эффектами:

- увеличением рассеиваемой мощности транзистора и, как следствие, увеличением температуры его канала;
- коллапсом тока под действием высоких напряжений.

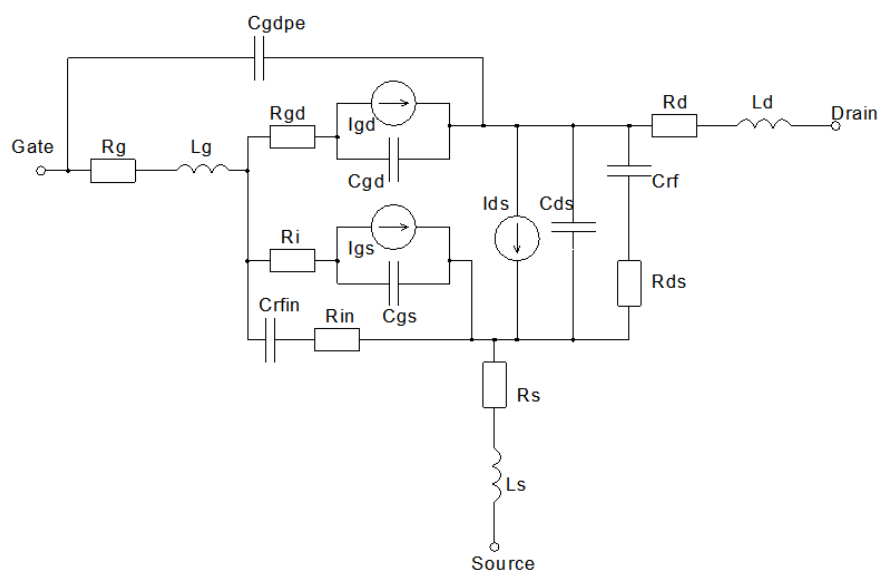


Рис. 2. Эквивалентная схема нелинейной модели полевого транзистора[1]

Но, как было показано во второй главе, в гетероструктурах на основе  $(Al,Ga)N/GaN$  с двойным ограничением канала эффекты коллапса практически отсутствуют, и потому падение тока стока может быть описано достаточно простым выражением, учитывающим потребляемую устройством мощность. При напряжениях на затворе, близких к напряжению отсечки, наблюдается увеличение тока стока при увеличении напряжения на стоке. Этот эффект связан с тем, что на гетероструктурах  $(Al,Ga)N/GaN$  барьер Шоттки имеет достаточно высокие токи утечки, которые проявляются подобным образом на вольт-амперных характеристиках. Учёт затворного тока в характеристиках тока стока позволяет точнее описать ход кривой. На рис. 4 показаны зависимости тока стока и крутизны от напряжения на затворе при нескольких напряжениях на стоке. Как видно из графиков, расчётные кривые достаточно точно описывают измеренные характеристики. В ходе анализа характеристик транзисторов на гетероструктурах

(Al,Ga)N/GaN были выработаны рекомендации по проектированию усилителей мощности на их основе.

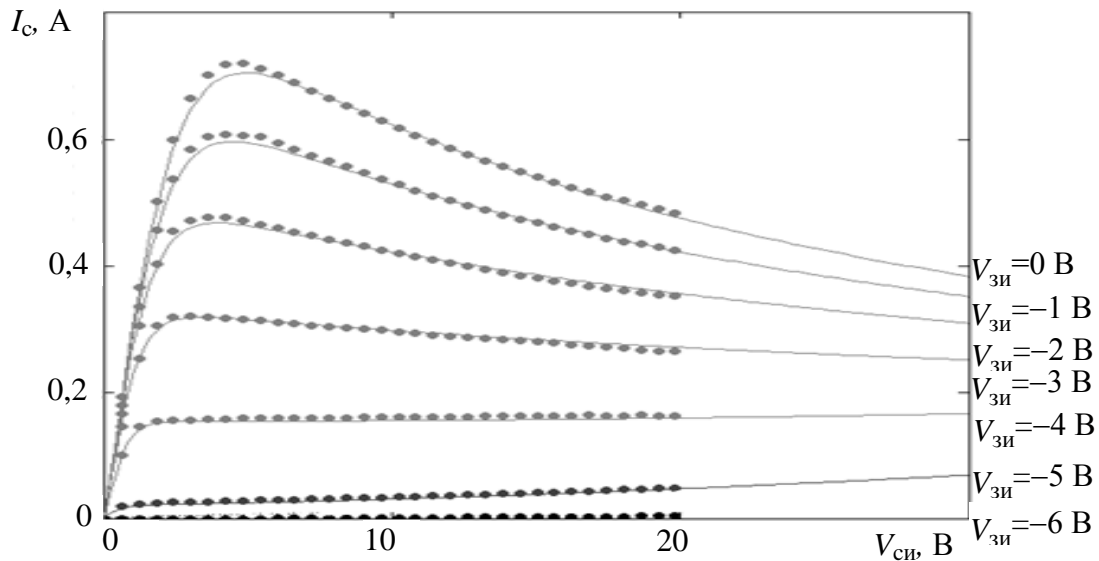


Рис. 3. Семейство ВАХ транзистора на гетероструктурах GaN/AlGaN. Сравнение расчётных (непрерывная линия) и измеренных (точки) характеристик

Точность описания вольт-фарадных характеристик может значительно влиять на результаты расчётов различных нелинейных схем, в частности, схем СВЧ-усилителей мощности. Используемые в настоящее время

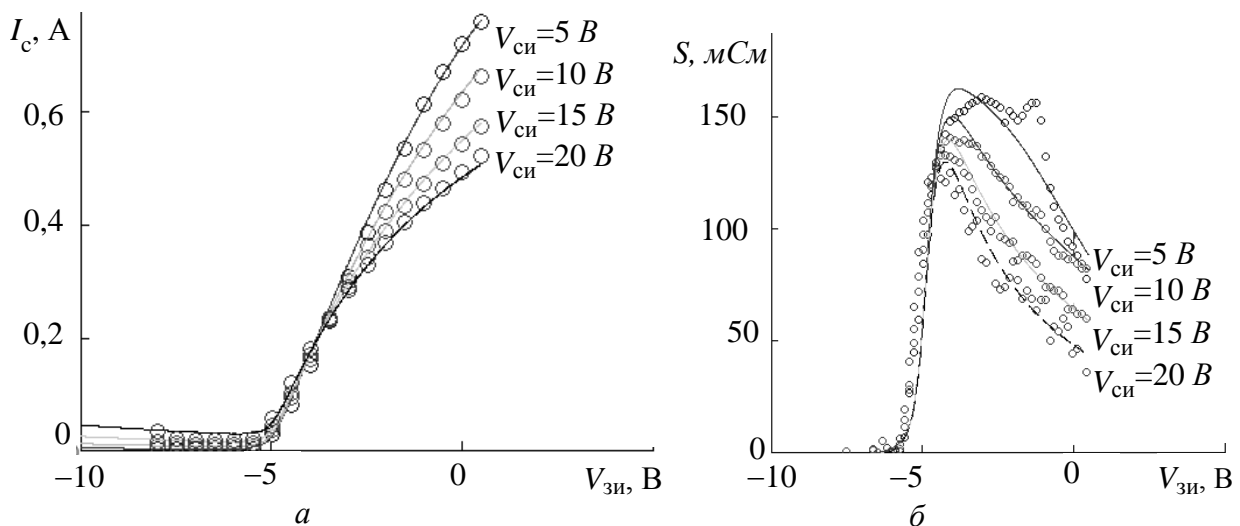


Рис. 4. Зависимости тока стока (а) и крутизны (б) от напряжения на затворе транзистора на гетероструктурах (Al,Ga)N/GaN. Сравнение расчётных (непрерывная линия) и измеренных (точки) характеристик

модели вольт-фарадных характеристик для Spice-анализа базируются на выражениях для заряда, содержащегося в такой емкости и зависящего от

напряжения. Для емкости, нелинейно зависящей от приложенного напряжения, справедливо выражение:  $C = dQ/dV$ .

В литературе предлагается несколько функций для аппроксимации такой зависимости. Модели, предложенные в [1] и [2], недостаточно точны при напряжениях, близких к напряжению отсечки. Это связано с тем, что для описания области перегиба используется симметричная функция, в результате чего кривая в области напряжений вблизи напряжения отсечки расходится с экспериментальными данными. Вольт-фарадную характеристику транзистора на гетероструктурах (Al,Ga)N/GaN можно разделить на три области [3] (рис. 5).

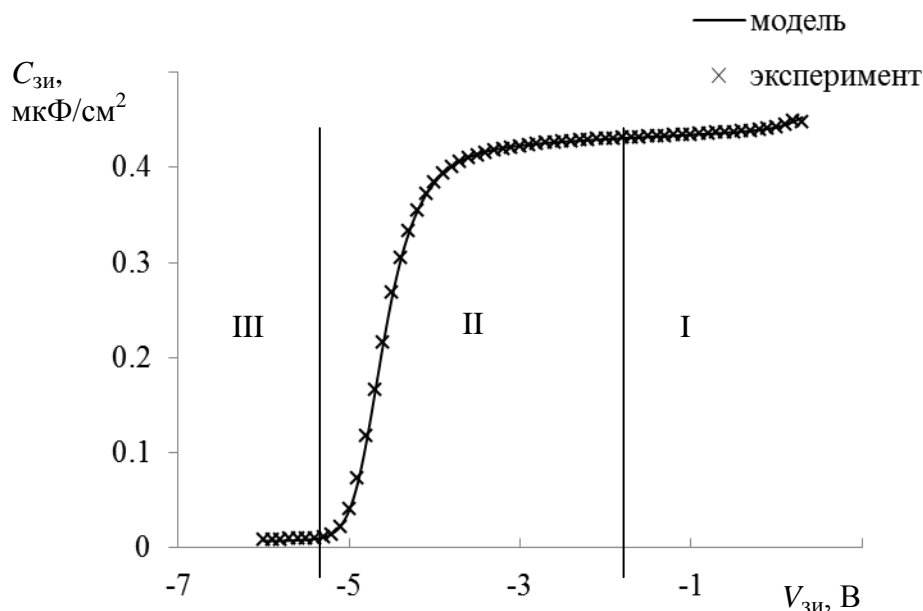


Рис. 5. Вольт-фарадная характеристика транзистора на гетероструктурах (Al,Ga)N/GaN. Сравнение расчётных (непрерывная линия) и измеренных (кресты) характеристик

Область I обусловлена наличием между затвором и слоем двумерного электронного газа (2DEG) легированной области (Al,Ga)N с высокой концентрацией свободных носителей. При подаче отрицательного смещения на электрод с барьером Шоттки толщина обедненного слоя увеличивается, а значит ёмкость уменьшается. При увеличении смещающего потенциала зависимость переходит в область II, где емкость связана с глубиной залегания слоя 2DEG. Таким образом, возникает конденсатор, одной об-

кладкой которого служит электрод катода, а другой – слой 2DEG. При дальнейшей подаче смещающего потенциала (вплоть до порогового) ёмкость перехода меняется незначительно, что объясняется искривлением зон в области гетероперехода. Когда напряжение становится больше напряжения отсечки остаётся только ёмкость, связанная с геометрическими ёмкостями электродов и ёмкостью, создаваемой в объёме гетероструктуры зарядом свободных носителей.

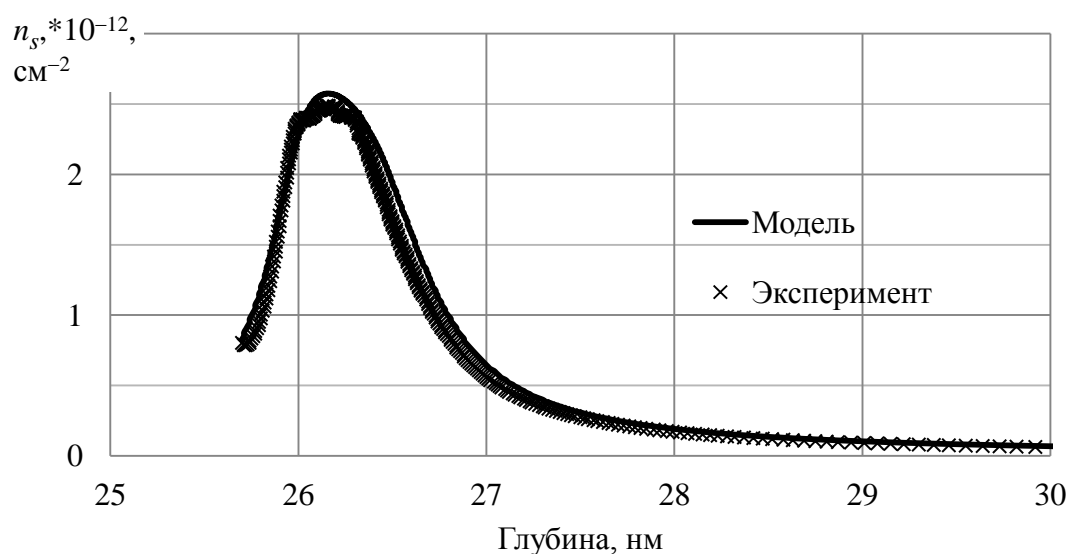


Рис. 6. Зависимость поверхностной концентрации электронов от глубины. Сравнение расчётных (непрерывная линия) и измеренных (кресты) характеристик.

Полученные математические выражения были «встроены» в нелинейную модель полевого транзистора из работы [2] в программной среде автоматизированного проектирования AWR Microwave Office, чтобы в дальнейшем рассчитать нелинейные амплитудные характеристики транзистора и усилителей мощности на его основе.

**В четвертой главе** рассмотрены вопросы ограничения выходной мощности СВЧ-усилителей, связанные с падением к. п. д. Важным ограничением такого типа является резкое возрастание плотности высокочастотных токов в металле затвора. Это приводит к чрезмерному разогреву, снижению коэффициента усиления, снижению к. п. д. и выходу изделия из строя. В рамках диссертации была исследована работа транзистора на гетероструктурах (Al,Ga)N/GaN в импульсном и непрерывном режимах. На

основе полученных данных сделаны выводы о значительном влиянии этого эффекта на работу транзистора.

Для расчёта плотностей высокочастотных токов в затворе транзистора была разработана численная модель такого затвора, позволяющая рассчитать его высокочастотные характеристики. Для балочного затвора длиной 0,5 мкм и высотой 0,5 мкм получена линейная плотность тока 330 мА/мкм при входной мощности 100 мВт на затворе. Причём наибольшая линейная плотность тока в такой геометрии достигается в месте перехода с металла разводки на затвор (рис. 7).



Рис. 7. Распределение линейной плотности высокочастотного тока в затворе транзистора

При линейной плотности тока 250 мА/мкм температура затвора может достигать 350-370 °С [4], что приводит к перегреву канала транзистора и снижению коэффициента усиления по мощности.

Для уменьшения линейной плотности тока была оптимизирована геометрия затвора. Для этого были проанализированы её различные варианты, в том числе уже применяемые в современной СВЧ-микроэлектронике. Наилучшим вариантом оказалась комбинация нескольких видов топологии, содержащая грибообразный затвор, соединённый с изолированным затвором в месте перехода с металла разводки на затвор и в месте окончания затвора. Такая топология приводит к уменьшению общей линейной плотности тока и более равномерному его распределению по ширине при ширине затвора менее 100 мкм. Кроме того, предложенная топология мало влияет на СВЧ-характеристики транзистора.

**В приложении** приведены методики расчёта усилителей мощности. Представлены результаты разработки сверхширокополосного усилителя мощности для диапазона частот 100 МГц – 4 ГГц с выходной мощностью до 2 Вт и широкополосного усилителя мощности для диапазона частот 4 – 6 ГГц с выходной мощностью до 12 Вт. Приведено сравнение результатов расчёта и экспериментального исследования линейных и нелинейных СВЧ-параметров этих усилителей. Рассмотрено влияние параметров модели на характеристики конечного устройства. Благодаря полученным результатам, стало возможным оптимизировать схему широкополосного усилителя мощности.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ:**

- выбрана гетероструктура, оптимально подходящая для создания усилителей мощности;
- разработаны модели вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик транзистора на гетероструктурах (Al,Ga)N/GaN;
- определено влияние сигнала высокой мощности на характеристики транзистора и разработаны рекомендации по снижению этого эффекта;
- разработаны СВЧ-усилители мощности S-, L-, C-диапазонов.

### **Цитируемая литература:**

1. Statz H. GaAs FET Device and Circuit Simulation in SPICE // IEEE Transaction Electron Devices. 1987, Vol. ED-34.
2. Angelov I., Zirath H., Rorsman N. A new empirical nonlinear model for HEMT and MESFET devices // IEEE Transaction on MTT. 1992, Vol. 40, № 12.

3. Dang X. Z., Asbeck P. M. Measurement of drift mobility in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructure field-effect transistor // Applied physics letter. 1999, Vol 74, № 25.

4. Селезнёв Б. И., Романов В. Л., Драгутъ М. В. Влияние токовой обработки затвора на параметры ПТШ на основе арсенида галлия // Физика и химия новых материалов, Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2008, №1.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Калинин Б. В., Ламкин И. А., Тарасов С. А. Моделирование вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик DHFET на основе гетероструктур AlGa<sub>N</sub> / Ga<sub>N</sub> // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. №2., стр. 16-20

### Другие статьи и материалы конференций:

2. Пат. РФ № 2354010 / В. Г. Гук, Б. В. Калинин, Г. А. Филаретов и др. Трехэлектродный высокочастотный полупроводниковый прибор; опубл. 27.04.2009.

3. Квазимонолитный сверхширокополосный СВЧ-усилитель мощности на основе гетероструктур AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> / Б. В. Калинин, В. Г. Гук, В. П. Чалый, А. Н. Пихтин // Материалы 7-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы». – М. :Изд-во МГУ, 2010.

4. Разработка СВЧ монолитной ЭКБ на базе GaAs и Ga<sub>N</sub> технологий / В. Г. Гук, Б. В. Калинин, Г. А. Филаретов, Л. Б. Шустерман // Материалы 3-й общероссийской научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных РЭС» / Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010.



5. Усилитель мощности С-диапазона на гетероструктурах GaN-AlGaN / Б. В. Калинин, Л. Н. Житомирский, А. Ю. Белов и др. // Материалы 1-й Всероссийской конференции молодых учёных «Новые материалы и нанотехнологии в СВЧ-электронике». – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010.

Подписано в печать		Формат 60x84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>	Цифровая	Печ. л. 1.0
Уч.-изд.л. 1.0	Тираж 100	Заказ	печать	

Отпечатано в типографии СПбГЭТУ «ЛЭТИ»